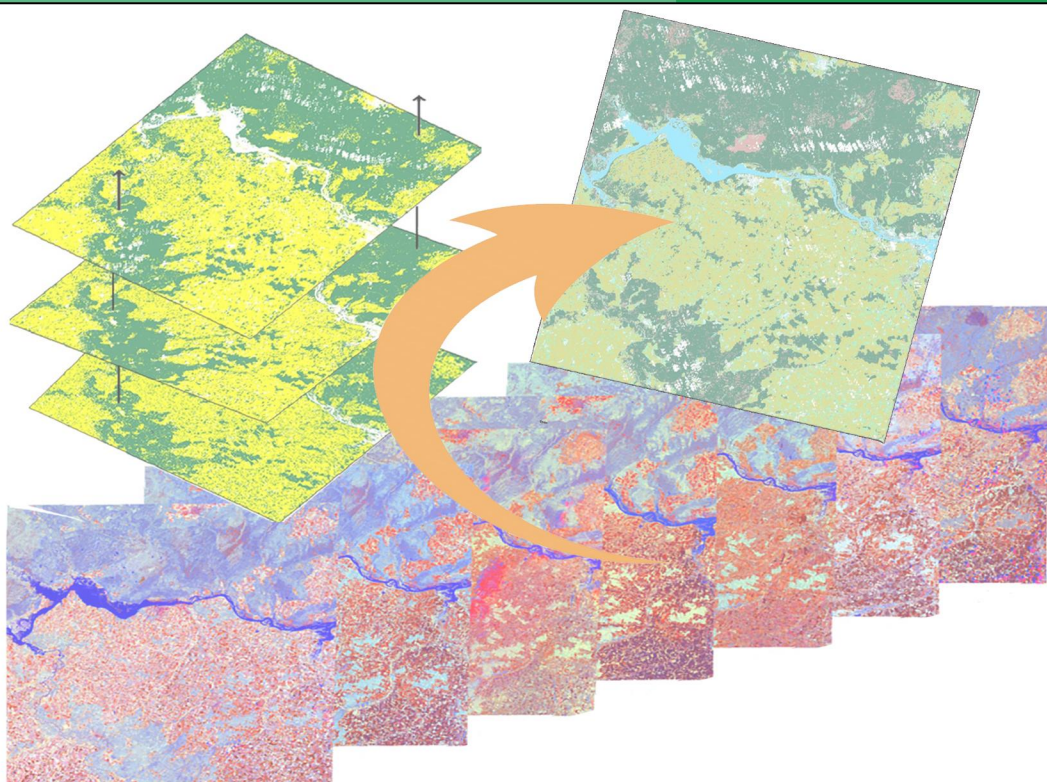


ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЛЕСНОГО ПОКРОВА В СРЕДНЕМ ПОВОЛЖЬЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ



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

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЛЕСНОГО ПОКРОВА В СРЕДНЕМ ПОВОЛЖЬЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

МОНОГРАФИЯ

*Под общей редакцией
профессора Э.А. Курбанова*

Йошкар-Ола
2019

Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation

VOLGA STATE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Center for Sustainable Forest Management and Remote Sensing

SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS
OF FOREST COVER DYNAMICS
IN MIDDLE VOLGA REGION ON THE BASE
OF SATELLITE DATA

Monograph

Edited by Professor E.A. Kurbanov

Yoshkar-Ola
2019

УДК 621.396.9:630*2(470.4)

ББК 32.884.1:43.4(2Рос-1)

П 82

Рецензенты:

доктор сельскохозяйственных наук **В.М. Жирин** (г. Москва)

доктор сельскохозяйственных наук **В.В. Пахучий** (г. Сыктывкар)

кандидат географических наук **Э.А. Терехин** (г. Белгород)

П82 Пространственно-временной анализ динамики лесного покрова в Среднем Поволжье по спутниковым данным: монография / О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов, Ю. А. Полевщикова, С. А. Лежнин; под общ. ред. проф. Э. А. Курбанова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019. – 200 с.

ISBN 978-5-8158-2118-7

В монографии представлен пошаговый алгоритм пространственно-временной оценки и анализа динамики лесного покрова на примере Среднего Поволжья по серии разновременных спутниковых снимков (1985-2014 гг.). Проведена классификация спутниковых снимков в современных геоинформационных программных пакетах. Выполнена оценка нарушенности лесного покрова за исследуемый период с использованием индекса нарушенности. Проведена оценка точности созданных тематических карт на основе интегрированной базы данных тестовых участков, заложенных в различных типах леса на исследуемой территории.

УДК 621.396.9:630*2(470.4)

ББК 32.884.1:43.4(2Рос-1)

ISBN 978-5-8158-2118-7

© Воробьев О.Н., Курбанов Э.А.,
Полевщикова Ю.А., Лежнин С.А., 2019

© Поволжский государственный
технологический университет, 2019

© Центр устойчивого управления
и дистанционного мониторинга лесов, 2019

UDC 621.396.9:630*2(470.4)
BBC 32.884.1:43.4(2Poc-1)

Reviewers:

doctor of agricultural sciences **V.M. Zhirin** (Moscow)
doctor of agricultural sciences **V.V. Pakhuchiy** (Syktyvkar)
candidate of geographical sciences **E.A. Terekhin** (Belgorod)

Spatio-temporal analyses of forest cover dynamics in Middle Volga region on the base of satellite data: monograph/ O. N. Vorobiev, E. A. Kurbanov, Yu. A. Polevshikova, S. A. Lezhnin; edited by professor E. A. Kurbanov. – Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2019. – 200 p.

ISBN 978-5-8158-2118-7

A step-by-step algorithm for spatio-temporal assessment and analysis of forest cover dynamics is presented using the example of the Middle Volga Region on the base of a series of multitemporal satellite images (1985–2014 years). The satellite images were classified in the geographic information software packages ENVI and ArcGIS. An assessment of the disturbance of the forest cover for the study period using the Disturbance Index (DI) is performed. The accuracy of the created thematic maps was assessed on the basis of an integrated database of test sites established in various types of forests in the study region.

UDC 621.396.9:630*2(470.4)
BBC 32.884.1:43.4(2Poc-1)

ISBN 978-5-8158-2118-7

© Vorobiev O.N., Kurbanov E.A.,
Polevshikova Yu.A., Lezhnin S.A., 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	10
Introduction	13
1. Состояние вопроса	16
1.1. Оценки лесов в связи с изменением климата	16
1.2. Использование спутниковой информации для дистанционного мониторинга лесов	18
1.3. Дистанционные методы мониторинга лесных территорий	22
1.4. Моделирование пространственного распределе- ния растительного покрова с учетом социально- экономических факторов	38
Выводы по главе 1	41
2. Природные условия Среднего Поволжья	44
2.1. Территория	44
2.2. Климат	45
2.3. Почвенные условия	48
2.4. Земельные ресурсы	52
2.5. Лесной покров	54
2.6. Социально-экономические условия региона	57
Выводы по главе 2	58
3. Методика исследований	61
3.1. Объект исследования	61
3.2. Методика закладки тестовых участков	61
3.3. Методика моделирования пространственной динамики лесного покрова по снимкам	68
3.3.1. Подготовка серии мультиспектральных снимков	69

3.3.2. Классификация спутниковых снимков	72
3.3.3. Маска класса «лесной покров»	79
3.3.4. Оценка нарушенности лесного покрова	81
3.3.5. Моделирование нарушенности лесного покрова	89
3.3.6. Пространственно-статистический анализ динамики лесного покрова	101
Выводы по главе 3	107
4. Моделирование пространственной динамики лесного покрова	110
4.1. Формирование базы данных тестовых участков	110
4.2. Тематические карты лесного покрова	112
4.3. Анализ нарушенности лесного покрова за 1985-2014 гг.	121
4.4. Пространственно-временной анализ лесного покрова	128
4.4.1. Интегрированная карта нарушений в Среднем Поволжье	128
4.4.2. Многофакторный регрессионный анализ	131
4.4.3. Прогнозная карта динамики лесного покрова	146
Выводы по главе 4	149
Заключение	154
Словарь терминов	160
Список литературы	163
Приложения	192

Список сокращений и условных обозначений

БД	База данных
ГИЛ	Государственная инвентаризация лесов
ГИС	Географическая информационная система
ДЗЗ	Дистанционное зондирование Земли
ЛХ	Лесное хозяйство
РМЭ	Республика Марий Эл
ЧР	Чувашская Республика
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 (Normalized Difference Vegetation Index)
AI	Аэрозольный индекс (Aerosol Index)
SWI	Индекс влажности почвы (Soil Water Index)
EVI	Усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index)
NBR	Нормализованный индекс гарей (Normalized Burned Index)
USGS	Геологическая служба США (United States Geological Survey)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

Landsat	Спутник дистанционного зондирования Земли Land Remote-Sensing Satellite
MSS	Многоспектральный сканер (Multi Spectral Scanners)
Br	Коэффициент «Tasseled cap» яркость (Brightness)
Gr	Коэффициент «Tasseled cap» зеленость (Greenness)
Wt	Коэффициент «Tasseled cap» влажность (Wetness)
DI	Disturbance Index
OLS	Метод наименьших квадратов (Ordinary Least Square)
GWR	Географически взвешенная регрессия (Geographical Weighted Regression)
WoE	Весовой признак (Weight of evidence)
DEM	Digital Elevation Model
HRSS	Сенсор спутника высокого разрешения (High Resolution Satellite Sensor)
NASA	Американское аэрокосмическое агентство
ESA	Европейское космическое агентство
TM	Тематическое картографирование
CD	Обнаружение изменений (Change detection)
GLC	Global Land Cover

ВВЕДЕНИЕ

Исследование причин и масштабов лесных нарушений на региональном и глобальном уровне является критическим при выработке решений по эффективному управлению лесным хозяйством. Понимание влияния различных факторов на динамику лесного покрова в более широком контексте требует проведения долгосрочного дистанционного мониторинга. Развитию дистанционного мониторинга для оценки лесных насаждений придается приоритетное значение в нескольких государственных директивных документах: «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2020 года» (2008), «Лесном кодексе» (2006) и «Методических рекомендациях по проведению государственной инвентаризации лесов» (2011).

Исследования данных проблем особенно актуальны для лесов региона Среднего Поволжья, которые за последние десятилетия были подвергнуты сильным пожарам, засухам, приведшим к их усыханию, ветровалам и буреломам. Остаются недостаточно изученными пространственно-временные масштабы таких нарушений, выявления закономерностей их периодичности, моделирования возможных сценариев динамики лесного покрова с учетом биотических и абиотических факторов. Решение данных вопросов требует применения современных подходов пространственно-временного анализа и детального мониторинга состояния лесного покрова с использованием данных спутниковой съемки.

В связи с этим разработанная нами методика моделирования динамики лесного покрова имеет важное научно-практическое и прикладное значение для осуществления дистанционного мониторинга лесов Российской Федерации, что также определяет актуальность проведенных работ.

Цель данных исследований – пространственно-временной анализ динамики лесного покрова в Среднем Поволжье Российской Федерации на основе ретроспективной оценки данных спутниковых снимков среднего и высокого пространственного разрешения. Исследования нарушенности лесного покрова в значительной степени основаны на методических подходах и алгоритмах, разработанных и апробированных учеными из Европейского Союза.

В монографии представлен пошаговый алгоритм пространственно-временной оценки динамики лесного покрова на примере Среднего Поволжья по спутниковым снимкам. Приведены результаты полевых исследований с закладкой тестовых участков в лесных насаждениях на исследуемой территории. Выполнена оценка нарушенности лесного покрова за 1985-2014 гг. с использованием индекса нарушенности (Disturbance Index, DI). На основе полученных в исследовании результатов выявлена закономерность динамики лесного покрова с учетом влияния факторов нарушенности с помощью методов множественной регрессии в среде ГИС.

В ходе исследования разработана и апробирована методика пространственно-временного анализа лесного покрова на основе базы полевых данных и серии спутниковых снимков (1985 - 2014 гг.). Проведена классификация спутниковых снимков в современных геоинформационных программных пакетах ENVI и ArcGIS. На основе полевых исследований создана база данных участков, нарушенных в результате антропогенного и природного воздействия на территории Среднего Поволжья, которая зарегистрирована в реестре баз данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности. В результате проведенной классификации разработаны и получены тематические карты изменения (динамики) лесного покрова по стратам на спутниковых сценах исследуемой территории за 1985-2014 гг.

По предложенной методике сформирована тематическая карта нарушенности лесного покрова региона Среднего Поволжья за 29 летний период. Проведена оценка точности созданных тематических карт на основе интегрированной базы данных тестовых участков, заложенных в различных типах леса на изучаемой территории. В работе установлена закономерность динамики участков, нарушенных в результате вырубок, лесных пожаров 2010 года и других нарушений лесного покрова. Проведен пространственно-временной анализ лесного покрова с учетом воздействия на него природных и антропогенных факторов (пожары, рубки).

Полученные материалы по тематическому картографированию нарушений и динамики лесного покрова на основе данных спутниковой съемки и ГИС-технологий вносят значительный вклад в развитие теории и методологии лесной инвентаризации, автоматизированного лесного дешифрирования и картографирования.

Составленные тематические карты, базы данных и рекомендации по оценке динамики лесного покрова могут быть использованы различными профильными организациями Среднего Поволжья для получения информации о нарушенных территориях, оптимизации различных видов лесохозяйственного пользования, а также при планировании и реализации лесоохранных мероприятий. Кроме того, результаты работы могут быть также использованы при осуществлении дистанционного мониторинга лесов, реализации лесохозяйственных мероприятий по повышению биопродуктивности лесных насаждений, комплексному использованию лесных ресурсов, созданию баз данных.

INTRODUCTION

Research into reasons and scale of global and regional forest disturbances is crucial in inspiring solutions for effective and sustainable forest management. Increased understanding of various factors that impact the changes of forest cover in a wider context requires long-term remote sensing monitoring. The issue of remote monitoring is prioritized in several national policy documents: “Strategies for the development of the Forestry complex of the Russian Federation for the Period until 2020” (adopted in 2008), “Forest Code of the Russian Federation” (adopted in 2006) and “Methodological Recommendations for National Forest Inventory” (adopted in 2011).

Research into these problems is particularly important for the Middle Volga region, the area which was significantly disturbed by extensive forest fires and draughts resulting in forest drying and wind falling. Spatial and temporal scale of these disturbances is still insufficiently explored, as well as the consistency of periodic sequence of such disturbances, and the modeling of potential scenarios of forest cover dynamics with due consideration of biotic and abiotic factors. In order to address these issues it is necessary to apply contemporary approaches of spatial and temporal analysis and detailed monitoring of forest cover using satellite imagery.

Therefore, the suggested method of forest cover dynamics is of great scientific, practical and applied relevance for forest remote sensing in the Russian Federation.

The research is aimed at spatial and temporal analysis of forest cover dynamics in the Middle Volga Region of the Russian Federation based on retrospective assessment of the satellite imagery with medium and high spatial resolution. The research into disturbances of the forest cover is largely based on methodology and algorithms developed and tested by EU researchers.

The monograph proposes a step-by-step algorithm of spatial and temporal assessment of forest cover dynamics based on the satellite

imaginary of the Middle Volga region. The monograph provides the results of field research with the establishment of test plots within forest plantations under study.

The authors carried out the assessment of forest cover over the period since 1985 to 2014 using Disturbance Index (DI). Based on the obtained results the consistency of forest cover dynamics in Middle Volga region has been identified taking into consideration the impact of disturbance factors using multiple regression methods in GIS environment.

The research provides thoroughly developed and tested methodology for spatial and temporal analysis of forest cover based on extensive database of field data and a series of multi-temporal satellite images (1985-2014). All the satellite imaginary has been classified using modern geographic information software packages ENVI and ArcGIS. As a result of field research the authors have developed the database of plots located in the Middle Volga Region disturbed in response to natural and/or anthropogenic impact. The data has been entered in the Database Register of the Federal Agency for Intellectual Property. As a result of the carried out classification technique, the authors have developed thematic maps of changes (dynamics) in the forest cover by the forest inventory strata on the satellite scenes of the area under study (1985 - 2014)

Using the suggested methodology the authors have developed a thematic map of disturbance in the forest cover of the Middle Volga Region for the 29-year period. The accuracy of the developed maps has been estimated by analyzing integrated database of sampling plots established in different forest types on the area under study. The research has revealed the regularities of the dynamics of plots disturbed as a result of felling, forest fires of 2010 and other disturbances in forest cover. Spatial and temporal analysis of the forest cover has been carried out considering natural or anthropogenic impact (forest fires, felling).

The obtained data significantly contribute to the theory and the methodology of forest inventory, automated forest interpretation and mapping.

The developed thematic maps, databases and recommendations for the evaluation of forest cover dynamics can be used by relevant organizations and companies of the Middle Volga Region to source information on disturbed territories, different kinds of forest use, and also for planning and implementation of forest protection activities. The results of research can be used in remote sensing, silvicultural operations aimed at enhancement of biological productivity of forest stands, integrated and complex use of forest resources and establishing databases.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Оценки лесов в связи с изменением климата

Леса планеты выполняют уникальную функцию на различном уровне, выступая природным каркасом в глобальном цикле углерода и естественной средой для уникального лесного биоразнообразия (Guariguata et al., 2008; Lewis et al., 2009; Poon, 2009; Исаев, 2008). Процессы природного характера и антропогенной деятельности (Андреев, 2012) становятся главной причиной изменений, вызывающих нарушение структуры лесного покрова, а также длительности периода вегетации лесной растительности (IPCC, 2019). Для обеспечения устойчивого развития лесов необходимо проводить своевременную оценку и прогнозирование изменений лесного покрова, который является важным компонентом последствий изменения климата.

Проблема изменения климата на сегодняшний день занимает одно из лидирующих позиций на международной арене, так как представляет собой серьезную угрозу развитию и существованию всего человечества (IPCC, 2014, 2018). Одним из важных механизмов, предположительно снижающих последствия этого современного феномена, является устойчивое управление лесами (Чернякевич, 2009; Курбанов, Воробьев, 2014; FAO, 2018). В этом процессе точные и оперативные оценки лесопользования и динамики изменений в лесном покрове различных стран мира предоставляют необходимые данные для принятия решений и выполнения обязательств по международным соглашениям в области изменения климата.

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; Jardine, 1994; Ogris and Jurc, 2010).

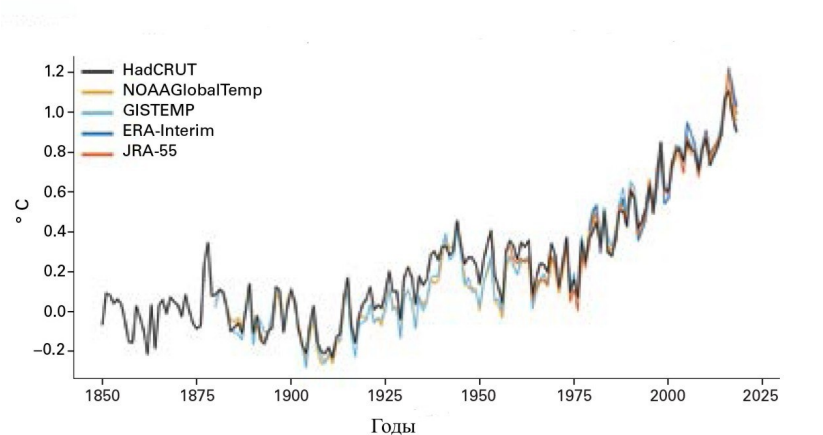


Рисунок 1.1 – Глобальная среднегодовая температура воздуха по данным разных метеостанций мира (WMO, 2019)

Последние исследования, проведенные ФАО ООН, указывают на то, что во второй половине XX века (с 1990 по 2005 г.) во всем мире наблюдалось снижение общей площади лесов. Результаты наблюдения свидетельствуют о снижении площади мировых лесов на 13 млн га в год (The state of the world's forests, 2018). Одновременно со сведением лесов наблюдается увеличение числа пожаров, всплеск численности насекомых и ветровалов. Это приводит к угрозе жизни людей, живущих вблизи ле-

сов, сокращению животного и растительного мира, вымиранию редких и исчезающих видов.

В Среднем Поволжье исследования ряда ученых (Курбанов, 2009; Kurbanov et al., 2007; Голубятников и др., 2005; Переведенцев и др., 2011; Воробьев и др., 2019) были направлены на изучение состояния и нарушенности лесных экосистем под влиянием изменения климата. Исследования в данной области основываются на выявлении факторов природного и антропогенного характера, которые послужили движущими силами изменения лесного покрова изучаемой территории.

В Марийском Заволжье основные изменения начались со второй половины XIX века, когда интенсивное лесопользование и лесозаготовки привели к существенному усыханию (сокращению) еловых насаждений и значительной нарушенности цельности лесного покрова (Демаков и др., 2014; Денисов, 2009; Демаков, 2018). Лесные пожары 1972 и 2010 годов стали еще одним существенным фактором изменения структуры лесного фонда в регионе Среднего Поволжья. В большинстве случаев лесные пожары приводят к значительному снижению площади хвойных насаждений и массовому размножению насекомых на сгоревших участках (Воробьев и др., 2012; Krylov et al., 2014). В то же время в постпожарный период на лесных гарях происходят активные сукцессионные процессы, смена породного состава и зарастание древесно-кустарниковой растительностью (Воробьев, Курбанов, 2017; Loboda et al., 2017).

1.2. Использование спутниковой информации для дистанционного мониторинга лесов

Активное развитие спутниковой съемки, геоинформационных систем (ГИС) и методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в Российской Федерации позволяет выполнять проекты в области лесного хозяйства, лесной инвентаризации и

лесоустройства на совершенно новом технологическом уровне. Дистанционные методы предоставляют возможность получения с высокой степенью эффективности объективных и оперативных данных о состоянии лесных экосистем на больших территориях (Сухих, 2005; Тетюхин и др., 2011; Черных, 2005; Heywood et al. 2006; Xie et al., 2008; Жири́н и др., 2011; Терехов, Чендев, 2018).

Спутниковые снимки в настоящее время успешно используются для выполнения различных задач лесного хозяйства: актуализации данных о состоянии лесов, учета лесного фонда, выявления очагов усыхания древостоев, обнаружения пожаров, мониторинга рубок леса (Пахучий, Шевелев, 2015; Immitzer et al., 2016; Szostak et al., 2017; Quintano et al., 2017; Yin et al., 2018). Данные ДЗЗ высокого разрешения пользуются популярностью при определении площадей лесов, изучении возрастной структуры и породного состава лесных массивов, выявлении спелых насаждений, мониторинге лесовозобновления на гарях, вредителей и болезней (Алексеев и др., 2006; Жири́н и др., 2012; Курбанов и др., 2013; Лабутина, 2004; Eisfelder, Krausa, 2011; Main-Knom et al., 2013, Kim et al., 2014).

В настоящее время, в связи с большим разнообразием доступных продуктов дистанционного зондирования Земли, пользователи имеют возможность выбрать продукт, наиболее отвечающий задачам их исследования (Devillers et al., 2007). Качество извлеченной информации о лесе на основе спутниковой съемки во многом зависит от следующих критериев (Van Oort и Bregt, 2005):

- набора данных для конкретной области применения (пространственное разрешение, тематическое содержание, территория охвата);
- доступности данных (финансовые / юридические ограничения);

- качества данных для определенного использования.

Последний критерий, как правило, выявляется путем сравнения таких данных, как случайные и систематические искажения, точность радиометрического прибора, датчиков и каналов связи с определенными минимальными требованиями (Agumaya and Hunter, 1999; Roussel et al., 2018) .

В большинстве исследований современные ученые используют спутниковые снимки разного пространственного разрешения. Выбор конкретного пространственного разрешения зависит от поставленных задач самого научного исследования, региона, от уровня и точности выполняемых работ. Обычно исследования с использованием разновременных мультиспектральных спутниковых изображений проводятся на локальном, региональном и глобальном уровнях.

Tang и др. (2012) привели обзор спутников высокого разрешения (High Resolution Satellite Sensors, HRSS), используемых для картографирования земной поверхности и дистанционного мониторинга состояния лесных ресурсов в Китайской Народной Республике. В работе были подробно рассмотрены главные составляющие спутниковых технологий, которые включают в себя дизайн датчиков, геометрическую калибровку, конструкцию модели построения изображения, блок регулировки и другие характеристики, связанные с улучшением точности изображений высокого разрешения HRSS.

В США был разработан метод автоматической сегментации при исследовании однородных по своим характеристикам лесных насаждений с использованием спутниковых снимков с пространственным разрешением менее 1 м (Wulder et al., 2008). Кроме того, была проведена оценка пригодности для этих целей панхроматических данных спутниковой системы IKONOS с пространственным разрешением 1 м.

Научные исследования глобальных и региональных масшта-

бов обычно проводятся на основе использования спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), который является одним из ключевых инструментов на борту американских спутников серии Terra и Aqua. Оперативные данные радиометра MODIS, позволяющего осуществлять ежедневный оперативный мониторинг территорий всей поверхности Земли, на сегодняшний день являются важной информацией для оценки изменения лесного покрова поверхности планеты. На основе данных MODIS можно получать информацию о состоянии лесных участков на отдельные территории исследования (Guindon et al., 2014; Барталев, 2004; Дробушевская и др., 2006; Ершов и др., 2013, Cano et al, 2017).

Группой ученых NASA была разработана глобальная тематическая карта наземного покрова Земли с пространственным разрешением 1 км, отражающая динамику растительного покрова (Hansen, DeFries, 2004). Результаты классификации данных радиометра MODIS прошли сравнение с данными тематических карт, полученных на основе AVHRR и Landsat TM. Значительные различия пространственной детализации наземных объектов показали данные AVHRR в лесной и аридной зонах по сравнению с тематическими данными MODIS.

Спутниковые снимки среднего разрешения Landsat получили наибольшее распространение при мониторинге состояния лесного покрова (Барталев, 2011; Терехин, 2010; Franklin, Wulder, 2002; Hansen et al., 2012; Жирин и др., 2014; Курбанов и др., 2014). К примеру, в Европе единственная общеевропейская карта наземного покрова, которая разработана в рамках программы об окружающей среде (CORINE), была получена на основе данных спутниковой съемки Landsat (Bossard et al., 2000) при минимальной единице картографирования 25 га.

В другом исследовании (Губаев и др., 2011) рассматривается использование данных Landsat для классификации растительно-

го покрова территории Среднего Поволжья с минимальной единицей картографирования 3 га. В данной работе была использована легенда карты наземного покрова по международной системе классификации LCCS (ФАО). Результаты тематического картографирования были сопоставлены с классификациями глобальных карт, что позволило получить более совершенные карты на основе спутника Landsat с обоснованной точностью классификации.

1.3. Дистанционные методы мониторинга лесных территорий

Лесные экосистемы находятся в постоянной динамике в пространстве и во времени. Динамика лесного покрова понятна с точки зрения естественного процесса его роста, и ее можно изучать и контролировать посредством дистанционного мониторинга (Никитина, 2007; Хамедов и др., 2006; Хлюстов, 2012; Silva et al., 2017). Причинами изменений (нарушений) лесного покрова могут быть как отдельно взятый природный или антропогенный фактор, так и их комбинация. Воздействие различных факторов на изменения земной поверхности распределено неравномерно по всей ее территории.

Принимая во внимание, что концепция устойчивости стала ведущей в современной системе управления современной экономики Европейского Союза (The 2030 Agenda for Sustainable development ... , 2019) и Российской Федерации (Концепция развития ..., 2008), одной из важнейших задач на сегодня является оперативное получение точных и разновременных данных о ее лесных ресурсах. Понимание проблем нарушенности насаждений на больших территориях Российской Федерации должно быть основано на долговременном дистанционном мониторинге ее лесного покрова.

Особенностью применения ДЗЗ в области оценки лесных ресурсов является возможность выявления последовательных изменений состояния лесного покрова, обнаружения как резких, так и постепенных изменений в пространстве и времени. Многие зарубежные и российские исследователи выдвигали гипотезы и предлагали различные подходы к оценке изменений, происходящих в лесном покрове тех или иных стран и регионов. Согласно ряду работ (Fei et al., 2005; Main-Knorn et al., 2013; Жирин и др., 2012; Пахучий, Щанов, 2017), изменение лесных экосистем характеризуется несколькими процессами: нарушением и восстановлением лесного покрова. Оба процесса, влияя на продуктивность лесов и глобальный цикл углерода (Курбанов, 2007), представляют собой основу для дистанционного мониторинга растительного покрова (Терехин, 2017).

В научной литературе существует значительное количество методик, применяемых при исследовании динамики лесного покрова, которые можно обобщить в три большие группы:

- 1) использование тематического картографирования (thematic mapping);
- 2) обнаружение изменений (change detection);
- 3) применение вегетационных индексов.

К первой группе методик можно отнести работы по тематическому картографированию растительного покрова с использованием спутниковых снимков разного пространственного разрешения (Cihlar, 2000; Rogan et al., 2003; Елсаков и др., 2009; Коломыц, Шарая, 2014). Создание тематических карт проводится по двум отличающимся методам классификации: неуправляемая и управляемая (Duong et al., 2000; Jong et al., 2001).

В работе финских ученых (Makela et al., 2004) можно встретить применение метода неуправляемой классификации по алгоритму «ближайшего соседа» (k-nearest neighbor algorithm, KNN), на основе которого проведена оценка средних спектраль-

ных значений пикселей по спутниковым снимкам среднего пространственного разрешения Landsat TM. Данный метод нашел практическое применение в региональном управлении лесами этой страны с целью восполнения пробелов и повышения точности лесной инвентаризации по данным спутниковых изображений. За последнее десятилетие применяемый метод стал неотъемлемой частью национальной инвентаризации лесов в Финляндии.

Другая группа ученых (Holmstrom et al., 2003) использовала неуправляемый метод «ближайшего соседа для оценки спектральных показателей наземных (лесных) объектов в районе Великих озер в США. Результаты показали применимость данной методики при разделении тематических классов на лесные и нелесные объекты.

Американские ученые (Zhang et al., 2009) разработали методику оценки покрытия открытой поверхности и поверхности с лесной растительностью в рамках тематического картографирования городских районов Ottawa-Gatineau с типичным североамериканским ландшафтом на основе спутниковых данных Landsat TM. В работе были дополнительно использованы мультиспектральные снимки высокого пространственного разрешения Quick Bird. Результатом исследования стало соотношение между значениями каналов изображения Landsat тридцатиметрового разрешения и процентное соотношение между исследуемыми классами.

Ученые Орегонского университета в г. Корвалис (Krankina et al., 2011) изучали распределение, мониторинг и роль наземного покрова в глобальном цикле углерода. В качестве исходных данных ими были использованы карты распределения наземного покрова Global Land Cover (GLC, 2000) на основе снимков радиометра MODIS с грубым пространственным разрешением 500 м.

Выявленные различия в распределении растительного покрова нашли дальнейшее применение в виде входных данных в модели дистанционного мониторинга состояния растительности и динамики углерода.

Аналогичная методика с комбинацией спутниковых снимков разного разрешения была представлена в работе греческих ученых (Mitri et al., 2011). Исследование было направлено на мониторинг динамики и состояния лесных экосистем после пожара. Ими были использованы данные спутниковой съемки высокого пространственного разрешения (Quick Bird) и гиперспектральных изображений (EO-1 Hyperion). Работа была направлена на картографирование выгоревших лесных участков. Классификация спутниковых снимков показала высокую оценку точности (83,7 %) проведенных работ. При классификации гиперспектральных изображений (Кондранин и др., 2011) наблюдалось несоответствие породного состава на гарях, точность карт была ниже на 8%. Полученные результаты (рисунок 1.1) в виде серии тематических карт представляют собой оценку процессов лесовосстановления и динамику развития экосистем после пожаров.

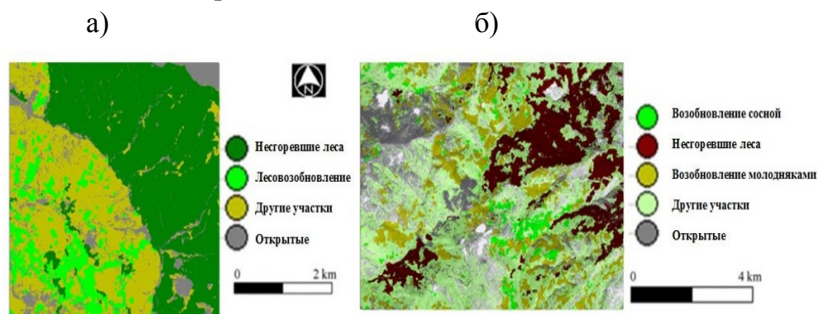


Рисунок 1.2 – Фрагменты классификаций данных спутниковой съемки: а) снимков высокого разрешения, б) гиперспектральных изображений EO-1 Hyperion (Mitri et al., 2011)

Методика картографирования с использованием разработок цифровой модели местности (DEM) и гидрографических данных была представлена американскими учеными (Murphy et al., 2008). Предложенный алгоритм описывает вероятную глубину залегания грунтовых вод на лесной территории вдали от ближайших водных объектов (река, озеро, болото и др.). Итоговые карты включают в себя следующие объекты: план дорог и волоков; автоматический выбор лучших мест пересечения дороги с водным потоком; сведение к минимуму работ по наземному передвижению во время строительства дорог; подробное указание на планах лесосек временных дорог и пересечений со сплавными трассами; очерчивание границ мест произрастания, свободных зон от использования механизмов, лесозаготовительных участков, посадок деревьев, участков с подготовкой места и с прореживанием лесных насаждений. Для проверки полученные данные визуально сравнивали с ландшафтными картами, которые содержали данные GPS-координат о границах заболоченных территорий, речных русел и пересечении дорог с водными объектами.

В Европе (Нидерланды, Германия) учеными (Jong et al., 2001) был разработан метод учета моделей отражения в соседних пикселях, где главную роль сыграл классификатор SSC (Spatial and Spectral Classifier) для пространственного анализа растительного покрова. В основе исследования было предположение о том, что информация в соседних пикселях спутникового изображения часто игнорируется обычными классификаторами. Классификатор SSC сочетает в себе преимущества двух методов классификации, основанных на спектральной информации конкретного пикселя и соседних с ним.

Широкое применение при мониторинге изменений, происходящих на поверхности Земли под влиянием изменения климата и деятельности человека, находят разновременные спут-

никовые снимки (Hepinstall-Cymerman et al., 2009; Hai-Hoa et al., 2013; Terekhin, Samofalova, 2015; Елсаков и др., 2014; Незамаев, 2013). Анализ данных спутниковой съемки позволяет выявлять изменения на больших площадях, а также проводить их оценку и валидацию. Такие исследования проводились в США, Бразилии, Европе, Африке, Израиле, России и ряде других стран.

Например, в исследованиях ученых из США и Европы (Walton, 2008; Seebach et al., 2011) разработана методика мониторинга изменений наземного покрова на основе сравнительного анализа тематических данных из различных картографических источников. В одном случае (Walton, 2008) были использованы два картографических источника: данные официальной государственной базы данных NLCD (National Land Cover Database) и классификации спутниковых снимков высокого разрешения AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Результаты показали высокую достоверность карт NLCD по сравнению с классифицируемыми спутниковыми снимками. Кроме того, сравнение показало не точные результаты при определении изменений относительной величины распределения древесного полога. В другом случае группа ученых (Seebach et al., 2011) рассматривала четыре картографических источника (рисунок 1.3), один из которых относился к официальной базе данных. Наилучший результат сопоставимости данных со спутниковыми изображениями показали данные растительного покрова программы CORINE (GLC, 2000).

В ходе других исследований по дистанционному мониторингу изменений растительного покрова в странах Европейского Союза была проведена статистическая обработка существующих данных. Например, в работе коллектива учёных во главе с Im (2008) осуществлялся корреляционный анализ данных объектов исследования с использованием методов управляемой классификации (объектно-ориентированная, дерево решений, метод

«ближайшего соседа»). Корреляционная оценка между значениями спектральной яркости объекта исследования и соседних участков показала более тесную связь при использовании объектно-ориентированной классификации (до 90 %). Результаты точности других методов классификации в этом исследовании достигали 80 %.

Учеными из Швеции (Olsson, 2011) получена модель линейной зависимости спектральных значений для различных типов лесных насаждений. Коэффициенты уравнения этой модели могут быть использованы для оценки характеристик молодых лесонасаждений, а также в целях совершенствования прогнозов биологической продуктивности лесов.

В последние годы для оценки и прогнозирования изменений в лесном покрове на основе спутниковых изображений находят применение следующие методы классификации (Zoran et al., 2005; Nelson et al., 2011; Ohmann et al., 2012; Rasi et al., 2011; Weihand, 2006): мультиспектральный смешанный анализ (Multitemporal Spectral Mixture Analysis, MSMA), максимальное правдоподобие (Maximum Likelihood, ML) и анализ главных компонент (Principal Component Analysis, PCA). Многоступенчатый процесс обработки разновременных сцен спутниковых снимков способствует оценке темпов обезлесения (вырубки лесов), а также проведению тематического картографирования пространственно-временной динамики и структуры растительного (лесного) покрова. Такие дистанционные технологии обработки и анализа спутниковых изображений находят свое применение в сочетании с широко используемыми вегетационными индексами (Elmore et al., 2000; Yang et al., 2012) и могут быть использованы в том числе на региональном и локальном уровне (Roder et al., 2008; Hostert et al., 2003) для оценки последствий лесных пожаров, прогнозирования динамики сукцессионных процессов и определения основных

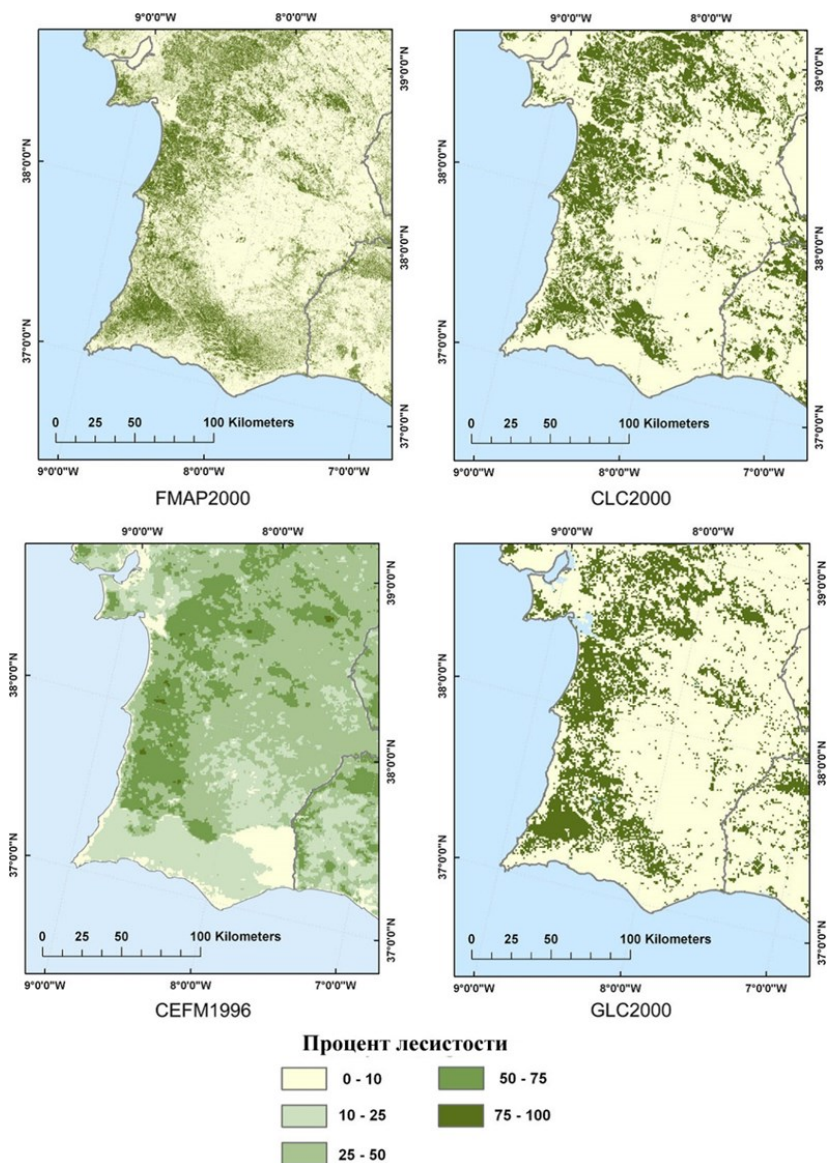


Рисунок 1.3 – Сравнительный анализ картографических данных (Seebach et al., 2011)

движущих факторов влияния на изменения растительного (лесного) покрова.

Например, группа ученых (Asmamaw et al., 2011) на основе аэрофотоснимков высокого пространственного разрешения и данных с французского спутника SPOT-5 провела мониторинг деградации землепользования в Эфиопии. Это позволило им выявить и оценить динамику растительного покрова в этой стране за относительно большой период времени (1958-2006 гг.). Ученые выявили, что на снижение биоразнообразия и высокий показатель эрозии почв оказали существенное влияние следующие факторы: рост населения, расширение сельскохозяйственных угодий, гражданская война и спрос на древесину для использования ее в виде топлива.

Для сегментации и классификации лесного растительного покрова широкое применение находят вегетационные индексы разного назначения, которые считаются важными индикаторами, отражающими состояние изучаемой подстилающей растительности. Большую работу в области мониторинга окружающей среды с применением вегетационных индексов и данных спутниковой съемки провели зарубежные ученые (Терехин и др., 2012; Shapiro-Miller et al., 2007; Brigitte et al., 2008; Wulder et al., 2008; Stellmes et al., 2013).

Для характеристики плотности лесного покрова группой исследователей во главе с Bhagata (2011) были сформированы тематические карты на основе нормализованного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и индекса влажности почвы SWI (Soil Wetness Index). Результаты исследований рекомендованы в качестве инструмента для оперативной оценки при облесении территорий.

Метод определения границ выделов разных типов леса с применением индекса AIC_{var} рассмотрен в работе финских ученых (Hou et al., 2013), которые для этого использовали данные

лазерного сканирования. По результатам работы была получена эмпирическая модель сегментации лесов, которая может быть использована в проектах по дистанционному мониторингу рубок леса и деградации лесов.

Другое исследование (Tanga et al., 2012) проводилось с целью изучения процесса фрагментации лесов во времени с использованием топографических карт и разновременных спутниковых изображений за период 1954-2010 гг в русле реки Ненжанг северо-восточной части Китайской Народной Республики. Разработанная методика заключалась в классификации древесно-кустарниковой растительности и лесного покрова по плотности (сомкнутости) лесного полога для выявления изменений возрастной структуры насаждений. Использование ландшафтных индексов, спутниковых изображений и центроидного метода оценки пространственной структуры лесного полога позволили коллективу авторов из КНР выявить тенденцию снижения лесистости в бассейне реки Ненжанг за период 1954-2000 гг. Последующие 10 лет также были отмечены высокой фрагментацией пространственной структуры исследуемой территории.

Вегетационные индексы часто находят применение при анализе изменений, оценке и дистанционного мониторинга состояния растительного и лесного покрова в различных регионах мира (Lawes and Wallace, 2008; Fensholt and Proud, 2012; Жирин и др., 2016; Пахучий и др., 2016; Räsänen et al, 2019). Использование индексов NDVI, TVI (Transformed Vegetation Index) и SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) подробно рассматривалось в коллективной работе ученых (Fatihaa et al., 2013), которые провели пространственно-временной анализ динамики и состояния растительности в полусухом (аридном) районе на основе серии спутниковых снимков Landsat (радиометров MSS и ETM+) за 1987-2006 гг. на терри-

тории Алжирской Народной Демократической Республики. Наиболее хорошо в данной исследовательской работе проявил себя вегетационный индекс SAVI, который позволил выявить отрицательные (уменьшение площади городских объектов) и положительные (развитие сельскохозяйственного производства) изменения на исследуемой территории.

В Израиле одно из исследований было направлено на выявление и оценку сезонных и ежегодных изменений лесной растительности в связи с засухоустойчивой погодой (Volcami et al., 2005). Актуальность проблемы исследования обусловлена тем, что засуха в Израиле является очень частым явлением (например, 1994-1995, 2001-2002 гг.). В работе использовались спутниковые изображения Landsat TM и ETM+, а также применялся нормализованный индекс растительности NDVI для выявления стрессовых условий. Результаты показали, что существует сходство между фотосинтетической активностью и динамикой NDVI в вегетационный период. Значительное снижение NDVI наблюдалось в период 1995-2000 гг. В стрессовых условиях (условия засухи) стало очевидно, что экологические факторы (почвенные условия, структура ландшафта) не коррелируют с динамикой NDVI.

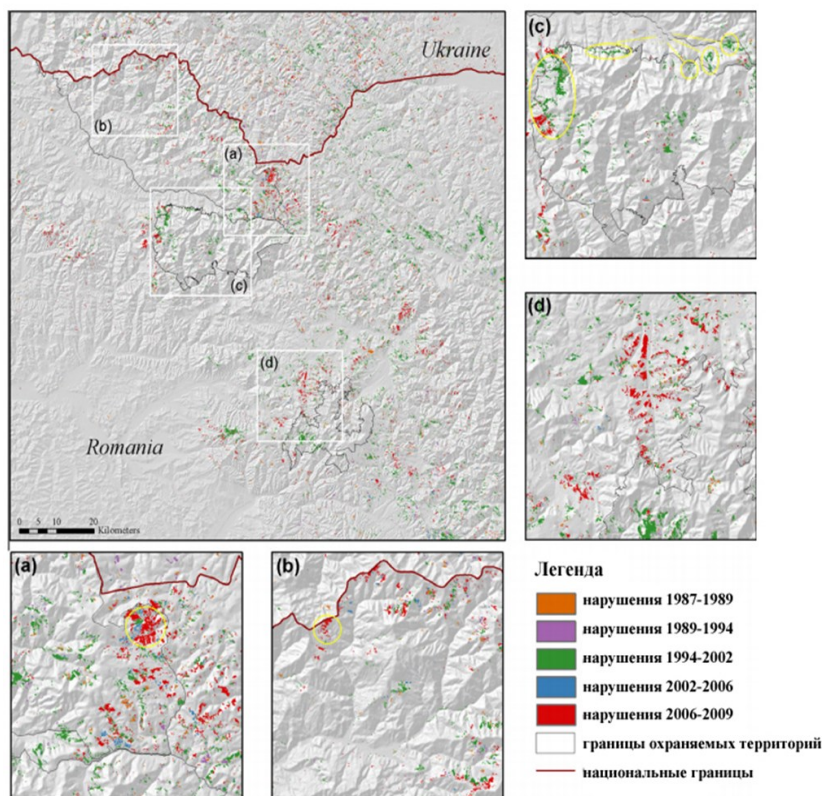
Другая группа индийских ученых (Kharol et al., 2013) в своей работе рассматривала последствия долгосрочных изменений земле- и лесопользования (LULC – Land Use Land Change) в районе провинции Раджастан (Индия). Для идентификации участков, которые наиболее хорошо отражают такие явления, как опустынивание или снежный покров, нашел применение аэрозольный индекс (AI – Aerosol Index). Данный индекс учитывает динамику метеорологических показателей. Результаты исследования обнаружили наиболее тесную связь изменения растительного покрова с распределением индекса на всей исследуемой территории.

В исследованиях ученых из Северной Америки (Knorn et al., 2012; Krankina et al., 2005; Kuemmerle et al., 2009; Townshend et al., 2012) также детально показана методика тематического картографирования нарушенности лесного покрова. В ее основу положен принцип применения индекса нарушенности (Disturbance Index, DI) к серии спутниковых снимков Landsat, прошедших преобразование Tasseled Cap («Колпачок с кисточкой»). Так, для наземных лесных экосистем Северной Америки (США и Канада) в рамках программы LEDAPS (Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System) была создана тематическая карта нарушений (вырубки, пожары и др.) за период 1990-2000 гг. Результаты этого исследования показали устойчивую динамику ежегодных изменений в 2-3 % для лесного покрова территории США и Канады.

В Румынии проведен анализ масштабов распространения рубок и лесовозобновления под влиянием социально-экономических факторов (Knorn et al., 2012). Значительное сокращение площадей лесного покрова было отмечено в период 1994-2002 и 2006-2009 гг., что связано с постсоветскими реформами в лесном секторе и незаконными рубками. В исследовании был применен индекс нарушенности (Disturbance Index, DI) для оценки изменений лесного растительного покрова за период 1986-2009 (рисунок 1.4). Общая точность картографирования составила 94,9 %.

Успешные попытки построения математической модели для проведения конверсионного анализа состояния растительного покрова были сделаны группой китайских ученых (Yu et al., 2011) на основе пространственно-временного анализа землепользования вдоль национальной дорожной трассы за 1996-2008 гг. Для этого были использованы данные динамики изменений (нарушений) в растительном покрове, произрастающем вдоль национальной трассы, и оценки видов землепользования на ис-

следуемой территории. Результаты этого исследования послужили хорошей основой при дальнейшей работе по прогнозированию состояния и динамики (нарушенности) растительного (лесного) покрова, включая данные социально-экономического развития региона исследования Китайской Народной Республики.



Российские ученые также активно проводят научные исследования в области дистанционного мониторинга растительного покрова. Среди них нужно отметить коллективы Института космических исследований РАН (Барталев, Исаев, 2004; Лупян и др., 2011; Спивак и др., 2011), которые показали современные возможности спутникового мониторинга при широкомасштабной оценке динамики бореальных экосистем Северной Евразии. В работах российских ученых были рассмотрены методы мониторинга лесной динамики на базе спутниковых изображений разного пространственного разрешения. Главными задачами исследования стали обнаружение изменений (нарушений) в лесном покрове, вызванных рубками, пожарами, вспышками численности насекомых, а также процессами естественного лесовосстановления и сукцессий. Кроме того, ими были разработаны методы оценки динамики лесного покрова на основе данных спутниковых наблюдений в оптическом диапазоне электромагнитного спектра. По результатам исследования была представлена информационная база данных спутникового мониторинга бореальных лесных экосистем на территории Северной Евразии (Барталев и др., 2004).

В последние годы в лесной отрасли Российской Федерации, а также при решении задач дистанционного мониторинга наземного покрова и отдельных объектов природопользования начинают также активно использоваться изображения высокого пространственного разрешения, полученные с отечественных спутников (Ресурс-П, Канопус-В), что является важным показателем импортозамещения в высокотехнологичной области космических исследований.

Для устойчивого управления лесными ресурсами и при анализе (мониторинге) растительного покрова за продолжительный период времени важно использовать качественные мультиспектральные спутниковые изображения. При анализе изме-

нений лесного покрова исследователи часто сталкиваются с проблемами (Van Oort et al., 2005; Giles, 2002), которые приводят к отрицательным результатам при тематическом картографировании. К ним относятся погрешности данных спутниковой съемки, ошибки при классификации спутниковых изображений, высокая облачность на спутниковых снимках, наличие теней, радиометрические искажения и многое другое (Warren et al., 2018; Chai et al., 2018).

На оценку точности тематических карт также влияет выбор метода классификации (Ahlqvist, 2011) спутниковых изображений. Группой ученых из Австралийского Союза (Manandhar et al., 2009) была разработана методика по улучшению точности управляемой тематической классификации спутниковых изображений на примере Нового Южного Уэльса (Австралия). К серии тематического картографического материала, созданных авторами исследования способом управляемой классификации «максимальное правдоподобие» (Maximum Likelihood Classifier, MLC) на основе спутниковых снимков Landsat, была применена пост-классификационная коррекция (Post-Classification Correction, PCC). Предложенный алгоритм основан на использовании вспомогательных данных (карты, планшеты, лесоустроительные описания, полевые данные и т.п.) и новых полученных знаний в процессе исследования с целью повышения точности проводимых работ. В результате общая точность классификации после проведения коррекции PCC была улучшена с 72 до 91 %. Дополнительная оценка по критериям теста McNemar¹ также показала более высокую точность тематических карт, полученных на основе этого алгоритма (рисунок 1.5).

¹ Критерий Мак-Немара (Куинн Мак-Немар американский психолог и статистик) предназначен для проверки нулевой гипотезы о том, что маргинальные частоты строк и столбцов таблицы сопряженности не различаются (Мастичкий, Шитиков, 2012).

С каждым годом к точности оценки картографирования и мониторинга изменений растительного (лесного) покрова предъявляются повышенные требования, особенно в быстрорастущих прибрежных городских конгломератах мира. В частности, китайские ученые (Yu et al., 2012) на примере городской застройки Яньтай представили новый способ повышения точности тематической классификации. Для каждого исследуемого мультиспектрального спутникового изображения были применены функциональные модули минимальной фракции шума (Minimum Noise Fraction, MNF) и индекса чистоты пикселей (Pixel Purity Index, PPI). Классификация разновременных спутниковых изображений, полученных авторами работы за последние 20 лет, показала среднюю оценку точности 91,4 и 83,8 % , что свидетельствует о высокой достоверности полученных данных.

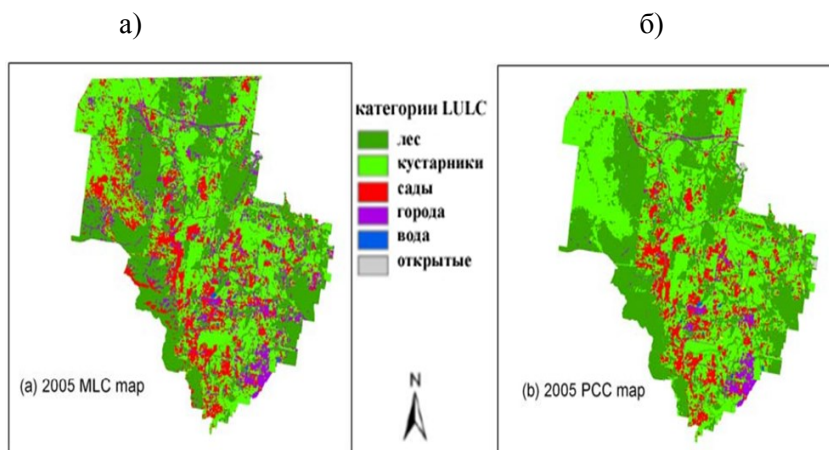


Рисунок 1.5 – Тематические карты , полученные двумя способами: а) классификация MLC (максимального правдоподобия), б) PCC (пост-классификационная коррекция)

1.4. Моделирование пространственного распределения растительного покрова с учетом социально-экономических факторов

Моделирование пространственного распределения лесного покрова является одним из ключевых факторов при исследовании глобальных изменений наземного покрова. В то же время возможность прогнозирования изменений (нарушений) в растительном покрове ограничивается пониманием того, как основные социально-экономические показатели влияют на землепользование в исследуемом регионе. Это подтверждают результаты исследований группы ученых (Hostert et al., 2011), которая провела сравнительный анализ изменения землепользования на территории республик бывшего СССР (Союза Советских Социалистических Республик) после его распада и ядерной катастрофы в Чернобыле (Украина). Темпы снижения площадей заброшенных земель в первом случае оказались в два раза выше, чем во втором.

Стремительное развитие технологий дистанционного зондирования Земли из космоса как важного инструмента мониторинга окружающей среды способствует решению серьезных насущных проблем по оценке лесного покрова и анализу его изменений (Sonnenschein et al., 2011). Оценка лесного покрова с учетом социально-экономических и экологических факторов проводится многими учеными (Xiao et al., 2006; Longa et al., 2007; Suzanchi et al., 2011) в разных регионах мира. Это оказывает решающее влияние на деятельность и принятие решений правительствами, представителями бизнеса и промышленными кругами, а также частными лицами и может иметь положительные последствия для эффективности ведения народного хозяйства и устойчивого развития территорий.

При моделировании пространственно-временного изменения растительного (лесного) покрова в зарубежной научной

литературе также широкое применение находят ландшафтные показатели (индексы). К ним относятся плотность лесного полога, пространственное распределение и форма (McGarigal et al., 2002; Gong et al., 2013; Volcani et al., 2005). Согласно результатам подобных исследований, данные ландшафтные показатели (индексы) сильно коррелируют между собой (Riitters et al., 1995; Müller et al., 2014).

В исследовании ученых из Китая и Индии (Xiao et al., 2006; Suzanchi et al., 2011; Longa et al., 2007) показана методика выявления причин изменения землепользования (Land use change) с использованием корреляционного анализа. В основе работ лежала комбинация различных методов классификаций и использование статистических функций. Высокие коэффициенты зависимости отражали силу влияния различных показателей на изменение земельного (лесного) фонда. Ведущими факторами урбанизации называются численность населения, индустриализация и политика в землепользовании; причинами деградации сельскохозяйственных земель стали проводимые экономические реформы.

В США (Bradley, Fleishman, 2008) при выявлении изменений в растительном покрове национального парка «Грейт Бейсин», расположенного в штате Невада, учеными дополнительно учитывались особенности топографии и использовалась серия разновременных спутниковых изображений Landsat. Причинами изменений в растительном покрове явились, с одной стороны, расширение ареала распространения хвойных насаждений и увеличение их густоты, а с другой – уменьшение его площади за счет частых пожаров и химического воздействия на лес. При построении прогнозных моделей долгосрочного изменения лесных экосистем авторами были получены важные закономерности их распределения с учетом биофизических показателей насаждений.

Группа ученых из штата Вашингтон США (Hepinstall-Sumerman et al., 2009) создала базу данных для разработки экологической модели взаимосвязи городских территорий с распределением наземного (растительного) покрова. Данная работа представляет собой пространственное моделирование динамики экологических систем в прошлом, настоящем и будущем, что является актуальным с точки зрения принятия решений в области политики, градостроения, экологии и природопользования.

Ключевым моментом при оценке влияния факторов на динамику лесного покрова является пространственное моделирование лесообразовательных процессов и их изменений во времени. В геостатистических исследованиях построение математических моделей позволяет описать и понять масштаб и структуру пространственной изменчивости растительного покрова. Ряд ученых занимались изучением данного вопроса (Meng, 2006; Kisaka et al., 2015; Ozelkan et al., 2015; Савельев и др., 2012; Чумаченко и др., 2004; Шарая, 2007; Ширнин и Роженцова, 2007). Например, в Бразилии динамика и оценка пространственного распределения биомассы лесов и растительного покрова исследовалась с применением вариограммного анализа и геостатистики (Sales et al., 2007).

В другом исследовании (Chen et al., 2012) предложена методика оценки пространственного варьирования свойств растительности. В основу методики положен принцип моделирования рельефа (Ticehurst et al., 2007) и использования вегетационных индексов с применением данных ДЗЗ. Классы растительного покрова включали в себя земли травянистого покрова, заболоченные участки и хвойные лесонасаждения. По результатам исследования определены процентные соотношения основных типов растительности (95 % – хвойные леса), анизотропное распределение структуры индекса NDVI, представле-

на методика улучшения оценки растительного покрова на региональном и глобальном уровнях.

Выводы по главе 1

Изучение причин и понимание антропогенного и природного фактора воздействия на экосистемы планеты, а также возможности контролирования изменений в наземном (лесном) покрове являются важными составляющими фундаментальных и прикладных научных исследований на сегодняшний день. Результаты таких исследований позволяют принимать правильные решения в области глобальных изменений климата, устойчивого развития территорий и обеспечивать устойчивое управление лесным комплексом.

По оценкам международной организации ФАО, площадь лесов Российской Федерации составляет 851 млн га, или 40 % от всей площади ее территории. За последние годы леса Российской Федерации, как и леса в других частях планеты Земля, испытывают нарастающее антропогенное и естественное (природное) воздействие (нарушения), которое представляет собой одно из ключевых причин снижения площади лесного покрова.

Проблемы оценки динамики растительного (лесного) покрова в изучаемом регионе Приволжского федерального округа Российской Федерации имеют непосредственное отношение к нескольким важным экономическим событиям последних десятилетий, изменивших структуру и форму ведения отечественного лесного хозяйства, в частности, в Среднем Поволжье. К основным таким событиям можно отнести: новый Лесной кодекс Российской Федерации (2006), арендные отношения в лесной отрасли, переход к постиндустриальным формам экономики народного хозяйства, повышение стоимости экспортных пошлин на древесину и другое. Все это привело к радикальной

смене владельцев земельных (лесных) участков, нелегальным вырубкам леса и, в конечном итоге, к смене лесопользования на огромных территориях.

Исторически сложившееся интенсивное лесопользование в Среднем Поволжье является результатом значительного уменьшения еловых насаждений и увеличения нарушенности большинства лесных экосистем. В ряде случаев главным фактором таких нарушений является существующая практика заготовки древесины – легальные и нелегальные рубки лесных насаждений. Кроме того, причинами нарушенности большинства хвойных и лиственных насаждений являются вспышки численности насекомых на площадях гарей и крупные лесные пожары 1972 и 2010 гг. В то же время в пользу последнего свидетельствуют неоднократные попытки создания искусственных лесонасаждений на данной категории земель. Однако анализ литературных данных свидетельствует, что большинство сформировавшихся естественным путем древостоев на площадях гарей отличаются более высокой производительностью и устойчивостью к неблагоприятным условиям среды.

Обзор литературы показал, что оценкой изменения лесопользования и нарушенности лесных насаждений занималось много ученых как за рубежом, так и в России. На практике предложено и апробировано большое число методик и алгоритмов проведения подобных работ. В настоящее время тематические карты лесного покрова, полученные на основе спутниковых изображений разного пространственного разрешения, стали необходимым вспомогательным материалом при проведении научных исследований и принятии решений представителями государственных структур и частного бизнеса.

Понимание пространственно-временных изменений в лесном покрове под влиянием социально-экономических и экологических факторов является важным условием для осуществления

устойчивого управления лесами, снижения влияния последствий изменения климата на человека и экосистемы планеты, наблюдения за глобальными изменениями и оценкой биопродуктивности лесов.

За последние десятилетия зарубежные и отечественные ученые и специалисты в различных областях народного хозяйства все более активно переходят к использованию современных методов дистанционного зондирования Земли в совокупности с программными средствами ГИС.

На сегодняшний день спутниковые снимки среднего и высокого пространственного разрешения являются все более общедоступными для широкого круга пользователей. В частности, их использование при проведении исследований нарушенности растительного покрова на больших территориях позволяет снизить общую себестоимость трудоемких работ на местности и предоставляет уникальные возможности для дистанционного мониторинга состояния и моделирования динамики лесных насаждений. Сочетание наземных обследований (пробные площади) и спутниковой информации повышает достоверность и точность проведения подобных исследований.

Несмотря на большое количество публикаций по тематическому картографированию лесов, региональные оценки в России остаются актуальными при решении проблем мониторинга и валидации создаваемых продуктов. Важность поставленной проблемы также обуславливается международными соглашениями по изменению климата, концепцией устойчивого развития, инвентаризацией стоков парниковых газов, а также необходимостью сохранения биоразнообразия экосистем.

В данном исследовании мы постарались принять во внимание все вышеприведенные выводы при выработке подходов по методике работ и разработке алгоритмов по оценке нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье.

ГЛАВА 2. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

2.1. Территория

Для пространственно-временного анализа лесного покрова была использована сцена спутникового снимка Landsat, расположенная в центрально-восточной части Восточно-Европейской (Русской) равнины (рисунок 2.1). Исследуемая сцена охватывает территории республик Марий Эл, Чувашии, Татарстана и Нижегородской области.

Дешифрирование и оценка пространственного распределения нарушенных лесных участков проводились для сцены 172p21r, где леса охватывают большую часть территории Республики Марий Эл.

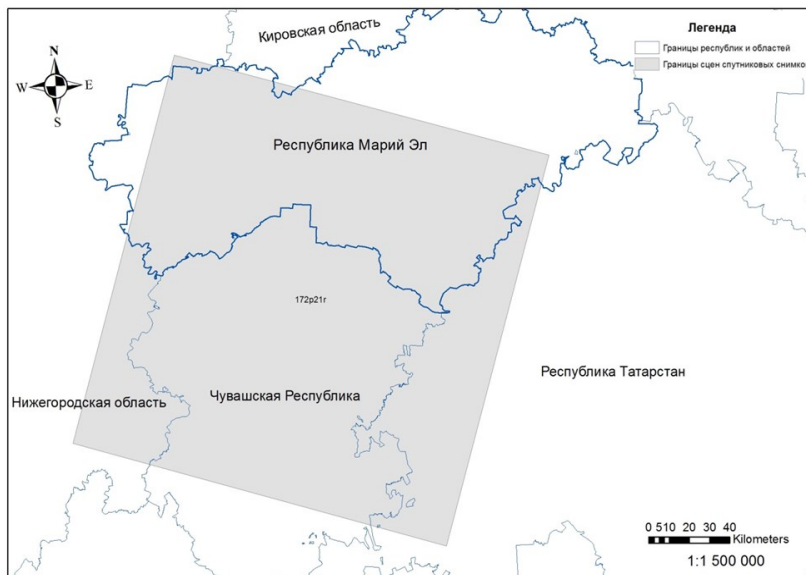


Рисунок 2.1 – Территория исследования с административными границами районов и сцен спутниковых снимков

Территория Республики Марий Эл (РМЭ), площадью 22,9 тыс. км², занимает западную часть левобережья – низменное левобережье Волги. 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 сеть РМЭ представлена сетью из 19 бассейнов и 179 рек. Самые крупные из них – Ветлуга, Волга и Сура (Aksenov et al., 2002; Чистяков, Денисов, 1959; 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 РМЭ проходит рядом с Кировской областью, на юго-западе – Чувашия, на юго-востоке – Республика Татарстан, на западе – Нижегородская область. Административным центром является город Йошкар-Ола.

Нижегородская область, вытянутая в меридиальном направлении, является одним из крупнейших регионов Центральной России. Столица – город Нижний Новгород.

Территория Республики Татарстан расположена в центре европейской части России, в месте слияния рек Волги и Камы. Административный центр – город Казань.

Чувашская Республика (ЧР) занимает правобережье Волги площадью 18,3 тыс. км², находится в центре европейской части России. Территорию республики разделяют на 21 административных района, столицей является город Чебоксары.

2.2. Климат

На всей территории исследования преобладает умеренно-континентальный климат. Характер климатических условий меняется в зависимости от расположения районов (таблица 2.1).

Для территории РМЭ, расположенной в континентальной

зоне умеренных широт, характерны продолжительная холодная зима, поздняя прохладная весна, короткое жаркое лето, дождливая и затяжная осень (Марийский ЦГМС, 2009). Летом среднемесячная температура июля достигает +18...+20 °С, зимой средняя температура января равна -18...-19 °С. Среднее количество осадков составляет 532 мм, наибольшее количество выпадает в вегетационный период.

Таблица 2.1 – Продолжительность сезонов, средние температуры воздуха и годовое количество осадков в РМЭ и ЧР по данным метеостанций в городах Йошкар-Оле и Чебоксарах

Территория	Продолжительность сезона, дней	Температура воздуха, °С			Количество осадков, мм
		сред- няя	макс.	мин.	
	Лето				
РМЭ	101	17	39	-3	215
ЧР	115	19	38	1	213
	Осень				
РМЭ	40	6,5	31	-19	153
ЧР	60	-2	25	-18	147
	Зима				
РМЭ	164	-10	15	-45	88
ЧР	120	-13	5	-44	92
	Весна				
РМЭ	60	7,6	32	-27	156
ЧР	70	4	25	-21	99

Климатические условия для Чувашии соответствуют лесостепной и лесной природным зонам, выраженные теплым летом, холодной зимой и благоприятными переходными сезонами с преобладающими ветрами западного направления (Чувашский ЦГМС, 2013). Средняя температура воздуха зимой составляет 13 °С, летом достигает +19 °С. Теплое лето и умеренно-холодная зима характерны для Республики Татарстан и Нижегородской области.

Равномерное распределение снежного покрова, постепенное снеготаяние, сопровождаемое поступлением талых вод в почвенно-грунтовую толщу, снижают роль климатического фактора в развитии эрозионно-денудационных процессов. Слабый дренаж территории повышает роль мезо- и микроформ рельефа и грунтовых вод в дифференциации природных комплексов (Тетерюк, Елсаков, 2012). Глубина промерзания почв составляет от 34 до 40 см.

В исследуемом районе наблюдается рост температуры атмосферы, что свидетельствует об увеличении потепления приземного слоя атмосферы (рисунок 2.2).

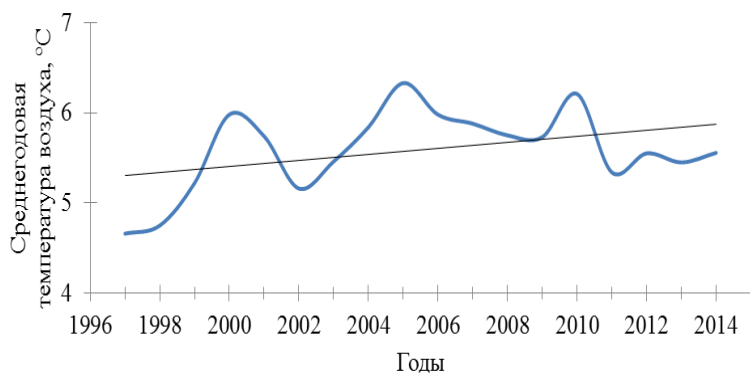


Рисунок 2.2 – Среднегодовая температура воздуха в Среднем Поволжье (по данным www.gismeteo.ru)

Анализ данных показал, что самая низкая температура воздуха была зафиксирована в декабре 1978 года, а максимальная температура – летом 1971 и 2010 гг. (Доклад об особенностях климата..., ФГБУ, 2014). Результаты таких отклонений свидетельствуют о значительной засухе и многочисленных пожарах на территории Среднего Поволжья, особенно в республиках Марий Эл и Чувашии.

В целом климатические условия Среднего Поволжья 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 осадков в течение вегетационного периода, падение в весенне-летнее время относительной влажности воздуха до уровня, вызывающего водный стресс у древесных растений.

2.3. Почвенные условия

Почвенные условия любого природного комплекса непосредственно влияют на его растительный покров и другие компоненты ландшафта. На изучаемой территории почвенный покров отличается многоконтурностью и мозаичностью. Широкое развитие отложений легкого гранулометрического состава, представленных песками, супесями и суглинками, а также слабая расчлененность рельефа усиливают влияние мезо- и микроформ рельефа и слабо минерализованных грунтовых вод на формирование почвенных разностей (Смирнов, 1968; Газизуллин, 1993).

В целом все почвы республики можно разделить на три типа: бурые лесные, коричнево-бурые лесные и дерново-подзолистые. Бурые лесные почвы сформировались, как правило, на двучленных наносах и имеют лёгкий гранулометриче-

ский состав (Газизуллин, 2005). Подстилающие породы и гумусовые горизонты богаты элементами питания, что вкупе с условиями аэрации и увлажнения способствует формированию высокогумусных почв, обладающих высокими свойствами для произрастания лесных пород. Все эти условия способствуют произрастанию на территории республики березы, осины и сосны высоких классов бонитета (I и выше) (Газизуллин, Сабиров, 1990).

Главной характеристикой коричнево-бурых лесных почв является отсутствие оподзоленности. Этот фактор связан с богатством минералогического состава и высокой карбонатностью подстилающих почвообразующих пород. Для данных почв характерны высокая порозность и низкая плотность сложения. Коричнево-бурые лесные почвы на территории Республики Марий Эл обладают высоким содержанием гумуса, которое постепенно снижается с глубиной (Газизуллин, Сабиров, 1997). Данные почвы хорошо подходят для произрастания высокопродуктивных древостоев главных лесообразующих пород и обладают высокими лесорастительными свойствами.

На делювиальных отложениях, расположенных в понижениях рельефа, а также на древнеаллювиальных песках формируются дерново-подзолистые почвы тяжелого или легкого гранулометрического состава соответственно. Благоприятные свойства для роста и развития древесных пород складываются в основном в гумусовом горизонте. При движении вглубь почв условия аэрации ухудшаются, особенно на почвах тяжелого гранулометрического состава. Эти условия могут меняться при смене почвообразующих пород на более легкие. Дерново-подзолистые почвы обладают хорошими условиями для роста и развития основных лесообразующих пород.

Механический состав почв региона меняется незначительно и составляет супесчаные и песчаные разности, распространен-

ные в южной части Республики Марий Эл. Также встречаются болотистые почвы, особенно в Заволжской низменности и в поймах рек. В северной части преобладают глинистые почвы и суглинки.

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.

В осевой зоне Марийско-Вятского вала расположены районы, которые наиболее подвержены эрозии почвы (Сернурский, Куженерский, Новоторъяльский, Моркинский, Волжский). Для этих районов характерна высокая распаханность сельскохозяйственных угодий и сильно расчлененный рельеф. Ветровая эрозия почв в республиках Марий Эл и Чувашия не наблюдается.

Основной фон почвенного покрова составляют дерново-подзолистые, светло-серые и коричневые бурые лесные почвы (Бажин, 2003). В понижениях междуречных равнин формируются интразональные почвы полугидроморфного и гидроморфного топов, представленные дерново-подзолистоглееватыми, глеевыми и местами торфяно-болотными почвами. Встречающиеся на территории почвенно-грунтовые условия по богатству (трофности) почв соответствуют нескольким типам лесов. В северной части изучаемой территории преобладают глинистые почвы и суглинки. Центральный и южный регионы представлены борами, где почвы наиболее бедные, с условиями увлажнения от крайне сухих песков по вершинам дюн до сырых и заболоченных в замкнутых котловинах, и субориями, где почвы сравнительно бедные, с условиями увлажнения от свежих до влажных (Государственный доклад о состоянии..., 2014).

Свежие боры являются наиболее распространенными типами сосняков (около 46 %). Коренными (исходными) типами леса являются сосняки мшистый и брусничный. Под влиянием пожаров в этих же условиях формируются сосняки вересковые и березняки брусничные (Калинин, 2010). Все сосняки свежего бора относительно одновозрастные, чаще чистые или с примесью березы. Производительность древостоев сравнительно высокая – I-II бонитет. Березняк брусничный аналогичен сосняку брусничному по производительности древостоев, характеру подлеска и живого напочвенного покрова. Как правило, в составе древостоя принимает участие сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), а напочвенный покров представлен развитием мхов и трав: вейник лесной (*Calamagrostis arundinacea* L.), брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.).

Формирование суборей в условиях песчаной низменности происходит в местах залегания дерново-подзолистых, глинисто-песчаных и супесчаных почв на слоистых древнеаллювиальных песчано-глинистых отложениях. Коренными типами леса суборей являются сосново-еловые насаждения с примесью березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh), реже осины (*Populus tremula* L). С переходом от свежих суборей к влажным и сырым увеличивается участие ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth). Поэтому коренными типами следует считать свежую елово-сосновую суборь, влажную еловую и сырую елово-березовую. В подлеске свежих и влажных суборей участвует липа мелколиственная (*Tilia cordata* Mill.). Свежие субори (B2) являются наиболее распространенными типами этой группы. В составе сосновых древостоев обычно имеется примесь ели сибирской (*Picea obovata* L.), березы, осины. В средневозрастных насаждениях сосны ель нередко находится еще во II ярусе (Денисов, 2011; Демаков и др., 2013).

Мшистые сосняки являются наиболее распространенными ассоциациями в защитных лесах Среднего Поволжья (Закамский, 2012). Характерной особенностью мшистых сосняков является мощное развитие напочвенного покрова из зеленых мхов. Еловые насаждения характеризуются довольно пестрой картиной разнообразного сочетания еловых ассоциаций с ассоциациями лиственных пород и не представляют однородный покров сплошного массива.

2.4. Земельные ресурсы

Земельный фонд Республики Марий Эл (рисунок 2.3а) распределен следующим образом: 54,6 % занимают земли лесного фонда, 32,9 % – составляют земли сельскохозяйственного назначения, остальные территории фонда включают в себя земли населенных пунктов (3,5 %) и промышленных районов (3,3 %). Иные категории земельного фонда Республики принадлежат к особо охраняемым территориям (2,5 %), землям запаса (3 %) и водного фонда (2,9 %) (Доклад об экологической ситуации..., 2014).

В структуре земельного фонда Чувашской Республики (рисунок 2.3б) общая площадь земельного фонда за 2014 год по состоянию на 1 января 2015 года составила 1834,5 тыс. га. Из них более половины площади от этой территории составляют земли сельскохозяйственного назначения – 55 %, земли лесного фонда доходят до 2 % (Доклад об экологической ситуации..., 2015).

В целях интенсификации сельскохозяйственного производства, рационального использования земельных (лесных) ресурсов, а также повышения производительности труда в сельском и лесном хозяйствах в обеих республиках Среднего Поволжья ведутся поиск и разработка новых более эффективных систем земледелия.

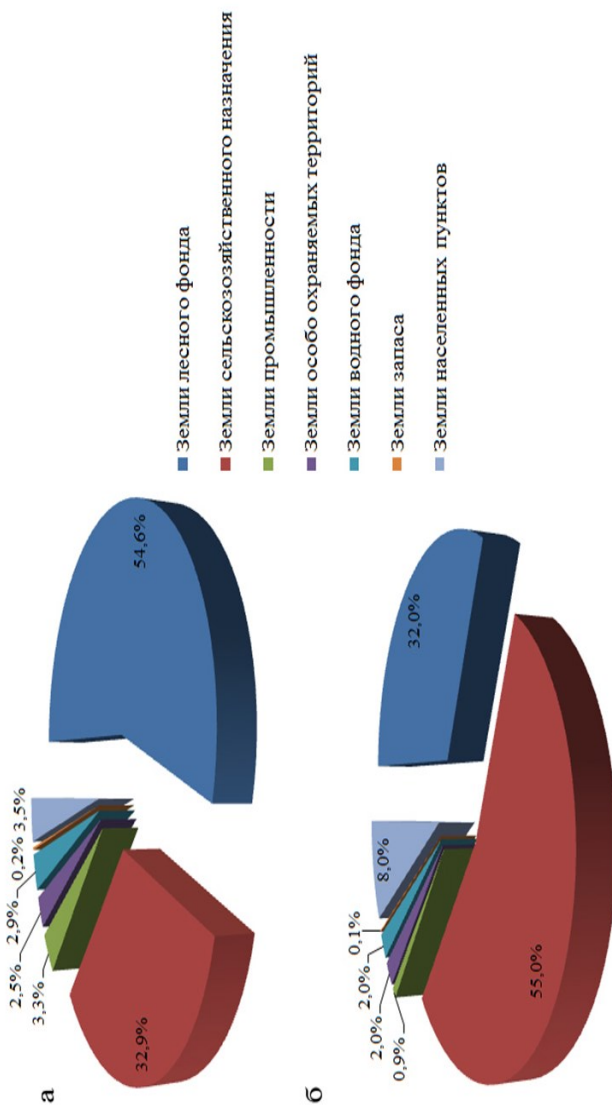


Рисунок 2.3 – Распределение земельного фонда по категориям на территории республик Марий Эл (а) и Чувашии (б)

2.5. Лесной покров

Главными лесообразующими породами исследуемого региона являются сосна обыкновенная, ель европейская, береза, повислая и пушисая, липа мелколистная и осина обыкновенная. Доля хвойных насаждений Республики Марий Эл (Марийского лесного Заволжья) составляет 47,5 % (таблица 2.2), которые занимают около 2/3 покрытой лесом площади. Среди лиственных лесных насаждений широко распространены березняки и осинники, преобладающая часть которых представлена молодняками и средневозрастными насаждениями, возникшими в прошлом столетии на обширных площадях гарей и вырубок.

Основная часть лесных массивов сосредоточена на западе республики, где на песчаных отложениях Марийской низменности лесной покров занимает свыше 80% территории. На юге Марийско–Вятского увала леса приурочены к песчаным флювиоглюциальным отложениям и занимают от 35 до 60 % территории. Северные и северо–восточные районы Марийско–Вятского увала снижают лесистость до 8 – 12 %. На водораздельных равнинах лесная растительность сохраняется небольшими куртинами.

Для Марийского лесного Заволжья в лесном фонде характерно преобладание молодняков и средневозрастных насаждений. Спелые и перестойные древостои, составляющие эксплуатационный фонд РМЭ, имеют ограниченные запасы, что свидетельствует об интенсивной эксплуатации лесов республики в прошлом. В большинстве лесничеств спелые и перестойные насаждения составляют от 7 до 20 % от общего запаса древостоев (Доклад об экологической ситуации в РМЭ, 2017). Самыми большими запасами древесины в Марийском Заволжье обладают Килемарское, Волжское, Пригородное и Кокшайское лесничества (Ежегодный доклад..., 2018).

Таблица 2.2 – Распределение площадей классов лесных насаждений

Насаждения	Площадь, тыс. га	Доля, %
Республика Марий Эл		
Хвойные	515,7	47,5
Твердолиственные	8,7	0,8
Мягколиственные	561,3	51,7
Всего	1085,7	100,0
Чувашская Республика		
Хвойные	181,4	32,0
Твердолиственные	127,0	22,4
Мягколиственные	258,6	45,6
Всего	567,0	100,0
Нижегородская область		
Хвойные	1638,1	47,66
Твердолиственные	86,6	2,52
Мягколиственные	1712,2	49,82
Всего	3436,9	100,00
Республика Татарстан		
Хвойные	271,1	23,32
Твердолиственные	191,3	16,46
Мягколиственные	699,9	60,22
Всего	1162,3	100,00

В целом анализ эмпирических данных по региону Среднего Поволжья показал, что наиболее лесистым районом всей территории исследования является Марийское лесное Заволжье (более 50 %), в то же время как в Чувашской Республике лесистость территории выражена гораздо слабее. В Республике Татарстан лесными насаждениями покрыто более 18 % всей территории, которая наиболее представлена лиственными породами искусственного происхождения.

В Нижегородской области лесистость насаждений колеблется значительно от 1 до 80 % на протяжении всей ее территории. Распределение основных лесных пород является неравномерным по всей территории Нижегородской области. По лесорастительному районированию границы исследуемой территории охватывают часть южной тайги с постепенным переходом в зону смешанных хвойно-широколиственных лесов (Лесной план, 2012).

Древесный подрост и подлесок лесных насаждений на исследуемой территории развиты слабо. По составу и происхождению они сходны с коренными лесными ассоциациями. То же самое относится к травянистому покрову древостоев. Моховой покров в лесных насаждениях оказывается значительно изреженным, а иногда и измененным в видовом составе (Доклад об экологической ситуации..., 2014).

Лесные нарушения наиболее широко представлены на территории Марийского лесного Заволжья. Самые крупные из них вызваны широкомасштабными вырубками лесов, буреломами и ветровалами, болезнями, усыханиями еловых древостоев (Алексеев и др., 2008) и лесными пожарами (Курбанов и др., 2015). Значительное число последних лесных пожаров стало результатом аномальной засухи на территории Среднего Поволжья Российской Федерации, вызванной экстремальными природными условиями летом 2010 года.

2.6. Социально-экономические условия региона

Социально-экономическое развитие Среднего Поволжья оказывает влияние на процессы, протекающие в лесном секторе (Чернякевич, 2004). За последние годы изменение структуры и формы ведения лесного хозяйства произошло в связи с введением нового лесного кодекса, арендных отношений в лесной области, повышением экспортных пошлин на древесину, переходом к постиндустриальным формам экономики. Это привело к значительным нарушениям лесного покрова, к смене лесопользования на огромных территориях, нелегальным вырубкам леса.

Рубки лесных насаждений как основной фактор нарушения лесного покрова являются экономически значимым направлением лесопользования. Кроме того, они служат фактором антропогенного воздействия на лесной фонд (Алексеев и др., 2005). Значительное влияние на изменение (нарушения целостности) лесного покрова исследуемой территории оказали сплошные рубки в результате проведения интенсивных сплошнолесосечных работ в период 90-х годов XX века. Это привело к замене на значительных территориях старовозрастных темнохвойных лесов вторичными лиственными насаждениями. Согласно существующим правилам рубок, площади вырубок в лесах могут достигать 50 га, в период 90-х годов допускались рубки размером до 200 га (Ярошенко и др., 2001). В последние годы наряду с доминирующими сплошными рубками появилась тенденция увеличения доли выборочных рубок лесов, что соотносимо с нарастающей проблемой нелегального лесопользования.

Экономическая деятельность человека и нерациональная практика землепользования оказывают непосредственное влияние на изменение лесной растительности. Рост численности населения ведет к повышению потребности в продуктах пита-

ния, соответствующему расширению сельскохозяйственных угодий, интенсификации землепользования, использованию земель под застройку и усилению деградации природных ресурсов (Пахучий, Пахучая, 2017).

Приведенные данные будут использоваться при разработке методики исследований, разработке пошагового алгоритма работ, а также проведении анализа результатов пространственного распределения нарушенности в лесном покрове.

Выводы по главе 2

Лесной покров исследуемого региона находится в тесной связи с характером геоморфологии, климатическими и почвенными условиями территории Среднего Поволжья. Климатические условия определяются географическим положением территории в атлантико-континентальной области умеренного пояса, в котором преобладают континентальные массы полярного воздуха.

Песчаный состав рельефообразующих пород является важным ландшафтообразующим фактором в регионе Среднего Поволжья. Быстрая инфильтрация атмосферных вод с повышенных участков вызывает здесь высокую сухость почвенного покрова. Одновременно с этим идет процесс формирования орштейнового горизонта в понижениях. Все это создает большие различия в почвенном увлажнении территории ландшафта, что, в свою очередь, определяет тип ее растительного покрова. Основной лесообразующей породой в этих условиях является сосна обыкновенная, которой сопутствуют лишь береза и осина, увеличивая свое участие в лесном покрове вместе с нарастанием влажности бедной песчаной почвы. В целом изменение почвенного увлажнения на территории исследований создается положением в рельефе месте и механическим составом почвообразующих пород.

При общей бедности песков лесорастительные условия в Среднем Поволжье сильно различаются в зависимости от степени увлажнения их глубины и стояния грунтовых вод. Оптимальные условия роста сосны обыкновенной наблюдаются на свежих песчаных почвах при глубине стояния грунтовых вод 2-4 м. Хуже условия роста наблюдаются на вершинах песчаных дюн, а ещё более худшие условия роста имеют место при поверхностном залегании грунтовых вод, в глубоких замкнутых понижениях. В условиях субори коренными типами леса на исследуемой территории являются сосново-еловые, а при сплошных вырубках и после пожаров легко возникают березняки и осинники.

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

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 сильнее выражен по междуречьям 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 РФ. Разнообразие ее лесорастительных условий (до 15 типов) характеризуется

различными уровнями трофности и влажности. Наиболее представленным является боровой тип (49,2 % всех лесных территорий) с преобладанием свежих боров (А2). Далее следуют свежие сурамени (С2) и субори (В2).

В целом рельеф исследуемой территории отличается определенной консервативностью. Невысокая энергия эрозионных процессов, с одной стороны, и слабая дренированность территории, с другой, обусловлены небольшой глубиной эрозионного 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.

Все вышеприведенные обстоятельства были учтены при разработке методики исследований, легенды классов наземного покрова с учетом страт государственной инвентаризации лесов и тематическом картографировании спутниковых сцен.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Объект исследования

Объектами исследований явились лесные насаждения, произрастающие на территории Среднего Поволжья. Апробация методики и оценки точности полученных результатов была проведена в республиках Марий Эл, Чувашия, Татарстан и Нижегородской области.

3.2. Методика закладки тестовых участков

В 2010–2018 гг. на лесных землях изучаемой территории были заложены и подробно исследованы тестовые участки, которые в дальнейшем были также использованы для создания ГИС базы данных наземных наблюдений лесных территорий и оценки точности тематического картографирования по спутниковым снимкам.

Закладка тестовых участков (рисунок 3.1) проводилась методом круговых реласкопических площадок (приложение 4 к Лесоустроительной инструкции, 2012) в древостоях основных лесообразующих пород Среднего Поволжья. На подготовительном этапе подбора тестовых участков проводился детальный анализ лесоустроительных материалов, лесохозяйственных регламентов, таксационных описаний лесничеств, планов лесонасаждений и другого доступного эмпирического материала. В результате подготовительного этапа работ были подобраны наиболее представленные участки лесного покрова чистых и смешанных лесных насаждений местности. В качестве дополнительных источников для подбора тестовых участков использовались материалы спутниковой съемки высокого и среднего пространственного разрешения (интернет-ресурсы Google Earth, Yandex, а также спутниковые снимки ALOS, Rapid Eye, Ресурс-П и Канопус-В).



Рисунок 3.1 – Тестовый участок в спелом сосновом насаждении Килемарского лесничества Республики Марий Эл

Географические координаты каждого заложенного тестового участка (площадью не менее 3 га) фиксировались на местности с помощью GPS-приёмника «GARMIN eTrex 20» с целью их последующей идентификации на спутниковых снимках. Данные по площади, породному составу и основным таксационным показателям (Верхунов, 2007; Курбанов, 2007) преобладающей породы древостоя (средняя высота, средний диаметр, возраст) исследуемых лесных насаждений заносились в учётные ведомости с заполнением абриса и привязкой к имеющейся рядом квартальной сети или другим объектам местности (дороги, линии электропередач и т.п.). В лабораторных (камеральных) условиях это позволило выявить тестовые участки и наложить их на спутниковые изображения разного

пространственного разрешения и другой картографический материал в программных пакетах Envi и ArcGIS.

С каждой точки местности, заложенной на тестовом участке исследуемого лесного покрова, была получена GPS координата, которая в дальнейшем была перенесена и идентифицирована на мультиспектральном спутниковом изображении Landsat в виде векторного слоя с лесотаксационной атрибутивной информацией (рисунок 3.2).

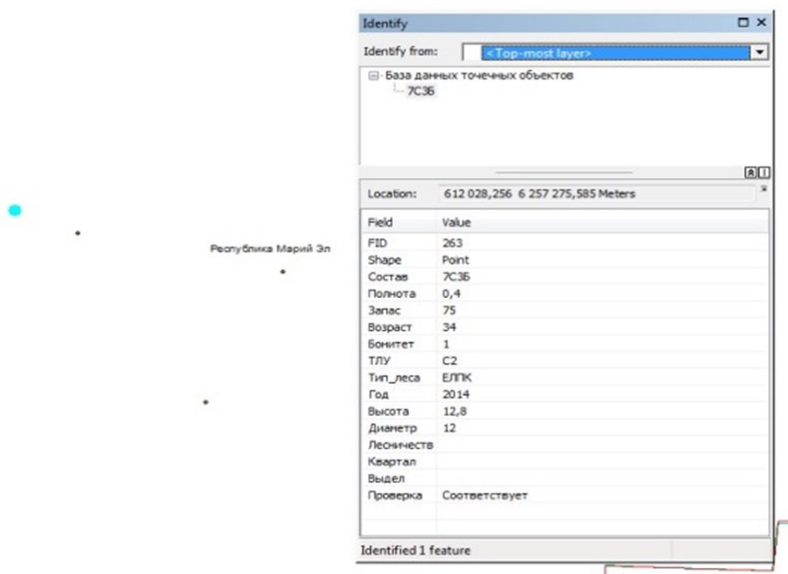


Рисунок 3.2 – Пример описания тестового участка точечного объекта в ArcGIS 10.3

Распределение тестовых участков представлено равномерно на изучаемой территории Среднего Поволжья, что демонстрирует рисунок 3.3.

Тестовыми участками также были охвачены площади лесных насаждений, подвергнувшиеся различным нарушениям (вырубки, гари, усыхающие древостои) (рисунок 3.4).

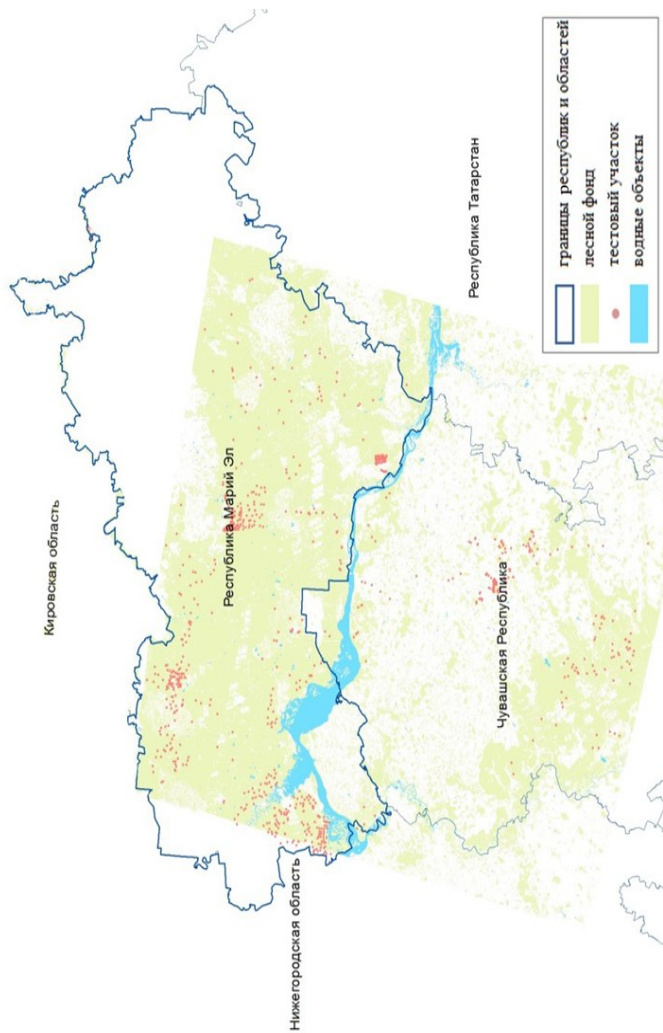


Рисунок 3.3 – Распределение тестовых участков на территории Среднего Поволжья



Рисунок 3.4 – Тестовый участок лесной гари

Крупные лесные пожары в Среднем Поволжье оказали многостороннее влияние на состояние лесных экосистем (Денисов 2012; Жирин и др., 2013; Иванов и др., 2009). Для оценки степени нарушенности лесных насаждений пожарами по спутниковым снимкам в регионе исследования были подобраны и адаптированы четыре класса лесопатологического состояния деревьев (Воробьев и др., 2014) в зависимости от степени повреждения: 1) отсутствует, 2) слабая, 3) умеренная и 4) сильная (рисунок 3.5) (Руководство по планированию..., 2007).

Границы гарей 2010 г. на всей территории исследования и характер изменений структуры древостоев внутри выделенных участков определялись на основе использования разновременных спутниковых снимков, а также нормализованного индекса гарей (NBR - Normalized Burn Ratio) (Kasischke et al., 2008; Hoscilo et al., 2013), который представляет собой разность спек-



Рисунок 3.5 – Классы нарушенности древостоев в зависимости от степени повреждения пожарами: а) отсутствует; б) слабо; в) умеренно; г) сильно

тральных отражений в ближнем и коротковолновом инфракрасных каналах, нормализованную на их сумму:

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

где TM4 и TM7 – спектральные значения двух каналов радиометра спутника Landsat в диапазоне 0.75-0.90 мкм и 2.09-2.35 мкм соответственно. Предпосылкой для применения этого индекса является сопоставление отражений от неповрежденной и пройденной огнем растительности по двум разновременным изображениям. После пожара в 4-м спектральном канале (инфракрасной зоне спектра) наблюдается снижение отражения светового потока, в то время как 7-й канал показывает более

высокие значения и вариацию по сравнению с другими каналами радиометра. Разница между этими спектральными каналами демонстрирует хорошие оценки лесных пожаров площадью более чем 200 га (Loboda et al., 2007; Fernández-García et al., 2018; Amos et al., 2019).

Выделение классов нарушенности насаждений на изучаемой территории проводилось по пороговым значениям ΔNBR , которые для каждого тестового участка на снимке определялись на основе средневзвешенного значения центрального участка размером три на три (3×3) пиксела (Курбанов и др., 2013).

Необходимым условием точности оценки значений ΔNBR в пределах тестового участка является выделение его для лесной страты, имеющей относительно однородные таксационные характеристики (состав, высота, полнота и степень повреждения пожаром). Полученные материалы и данные были использованы для тематического картографирования лесных гарей мето-

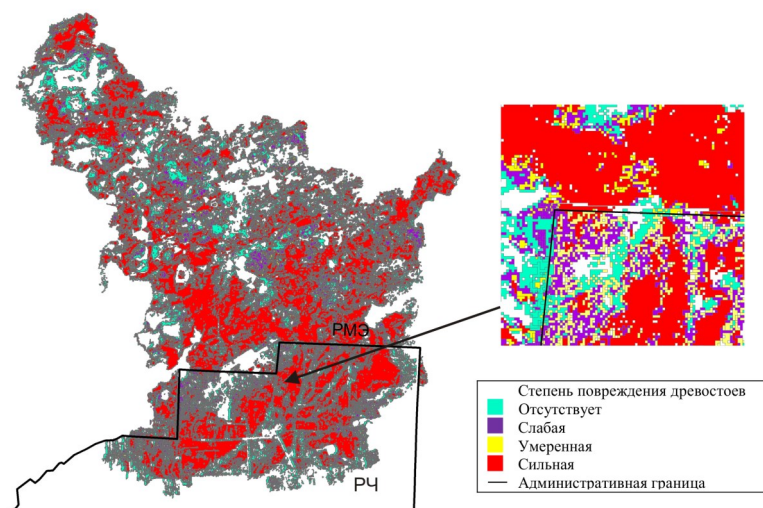


Рисунок 3.6 – Фрагмент тематической карты. Участок гарей 2010 г., по административной границе РМЭ (Кокшайское лесничество) и Чувашия (Чебоксарское лесничество)

3.3. Методика моделирования пространственной динамики лесного покрова по спутниковым снимкам

Пошаговые действия методики пространственно-временного анализа нарушенности лесного покрова более подробно описанные ниже, представлены в следующей блок-схеме:



3.3.1. Подготовка серии мультиспектральных спутниковых снимков

На сегодняшний день для долгосрочного мониторинга лесного покрова, включая ретроспективные данные 70-х и 80-х годов XX века, наиболее перспективны спутниковые снимки системы «Landsat» и Sentinel (ESA — Европейское космическое агентство), которые представляют собой универсальные данные для изучения глобальных изменений, наблюдения за поверхностью Земли и картографирования больших площадей растительного покрова (Курбанов и др., 2014). Для решения вопросов данного исследования в международной системе WRS-2 (Worldwide Reference System) была подобрана серия разновременных мультиспектральных спутниковых снимков (Landsat 4, 5, 7, 8 TM, ETM+ и OLI) на территорию исследования за вегетационные периоды с 1985 по 2014 гг. (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Основные характеристики используемых снимков Landsat (Path/Row - Колонка/Ряд)

Спутник	Дата съемки	Покрытие Path/Row
Landsat 4 TM	26 августа 1988	172/21
Landsat 5 TM	10 августа 1985	172/21
	14 июля 2010	172/21
	14 мая 2011	172/21
Landsat 7 ETM+	8 июля 1999	172/21
	27 мая 2001	172/21
Landsat 8 OLI	22 мая 2014	172/21

Все подобранные спутниковые снимки системы Landsat прошли радиометрическую (Radiometric) и атмосферную (Atmospheric Correction Module) коррекции в программном комплексе ENVI-5.2. Геометрическая обработка уровня 1G выполнялась для спутниковых снимков с использованием значений калибровочных коэффициентов.

Для дешифрирования объектов лесного покрова разновременные спутниковые снимки прошли процедуру линейного преобразования координат пространства спектральных признаков «Tasseled Cap» («Колпачок с кисточкой») (Курбанов и др., 2015). Данный алгоритм широко используется зарубежными исследователями при изучении растительного покрова (Chen et al., 2014; Healey, 2005; Huang et al., 2002).

Процедура «Tasseled Cap» представляет собой эмпирическое линейное преобразование шести каналов спутниковой сцены в три отдельных изображения BGW («Brightness» – яркость, «Greenness» – зеленость и «Wetness» – влажность). Это позволяет выравнивать значения спектральных показателей на снимках, сделанных в различные периоды фенологического состояния растительного покрова (май-август). Такое преобразование также дает возможность повышать разделимость классов наземного покрова и проводить более детальный анализ состояния лесных насаждений (Курбанов и др., 2013). Исследуемые изображения были визуализированы в виде синтеза пространства спектральных признаков «Tasseled Cap». Дешифрирование лесных объектов проводилось на сложном неоднородном фоне псевдоцветного изображения BGW (рисунок 3.7).

Для последующей работы с растровыми данными была сформирована бесшовная мозаика спутниковых изображений Landsat в пределах изучаемых сцен. Визуально комбинация сцен спутниковых снимков имеет существенные отличия, что позволяет точно выделять тематические классы.

При дешифрировании объектов местности один и тот же класс на разных спутниковых снимках находился в одном диапазоне спектральных характеристик за счет их линейного преобразования по методике Tasseled Cap. Это позволяет работать с созданной мозаикой спутниковых изображений и проводить оценку точности проведенной классификации на всей территории исследования Среднего Поволжья.

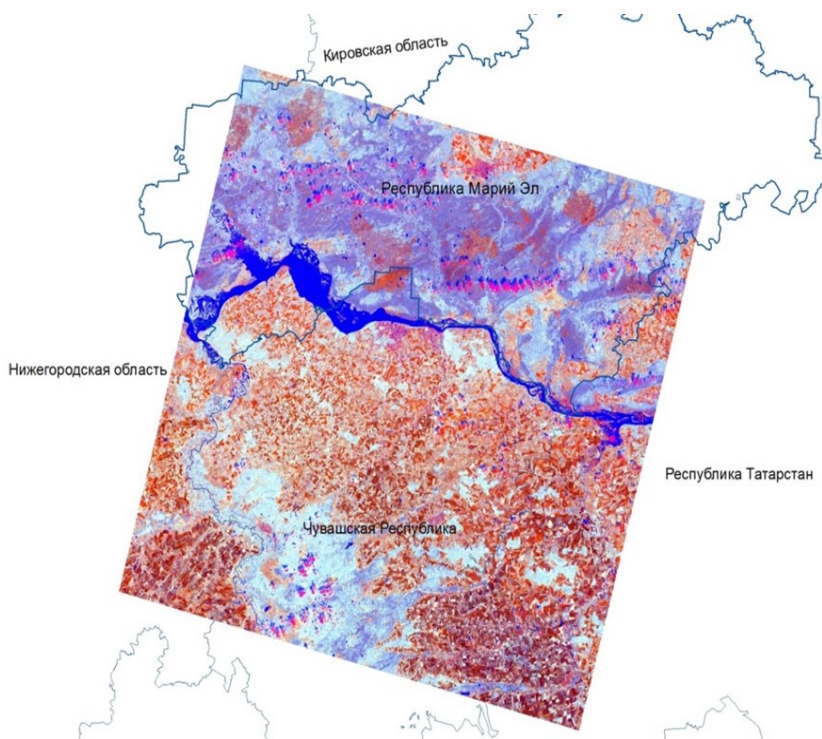


Рисунок 3.7 – Сцена спутникового снимка BGW Landsat на исследуемую территорию Среднего Поволжья

3.3.2. Классификация спутниковых снимков

Следующий шаг методики исследовательских работ заключался в выделении классов наземного (лесного покрова) на территорию Среднего Поволжья, на основании которых можно будет судить о степени нарушенности всех лесных насаждений региона. Для этого были использованы данные наших полевых исследований, спутниковые данные высокого пространственного разрешения, единая схема стратификации ГИЛ Российской Федерации и единая шкала окраски актуализированных карт-схем лесных страт. В целях классификации лесных страт растительного покрова в регионе Среднего Поволжья коллективом Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» ранее были разработаны и выделены 14 классов легенды наземного покрова (Курбанов и др., 2015).

В данном исследовании из разработанной ранее легенды были использованы только 7 тематических классов (страт) лесного покрова для региона Среднего Поволжья, различающихся по породному составу, происхождению, биологической производительности древесных пород и возрасту (таблица 3.2). Этих семи основных классов наземного покрова должно быть достаточно при классификации и оценке нарушенности лесного покрова, а также для проведения анализа существующих нарушений лесных насаждений и выявления распределения площадей нарушенных земель для исследуемого региона за изучаемый период времени.

Для приближения и использования сформированных тематических классов в практике лесоводства и лесоустройства возможно использование дополнительного деления классов наземного (лесного) покрова согласно единой схеме стратификации ГИЛ РФ (Государственная инвентаризация лесов).

Таблица 3.2 – Классы лесного покрова, используемые в работе

№	Наименование класса	Цвет
1	Светлохвойные спелые и перестойные средне-производительные	
2	Светлохвойные средневозрастные среднепроизводительные	
3	Мелколиственные спелые и перестойные среднепроизводительные	
4	Мелколиственные средневозрастные среднепроизводительные	
5	Смешанные спелые и перестойные среднепроизводительные	
6	Смешанные средневозрастные среднепроизводительные	
7	Молодняки естественного и искусственного происхождения	

К основным классам, доминирующим по породному составу на территории исследований, относятся светлохвойные, мелколиственные и смешанные леса. Если доля мелколиственных или светлохвойных пород составляла менее 75 % от общего состава насаждения, то леса классифицировались как смешанные.

С целью выделения групп возраста (молодняки, средневозрастные и приспевающие, спелые и перестойные насаждения) дешифрируемого класса лесного покрова каждый из полученных тематических слоев проходил детальную неуправляемую классификацию с заданным количеством градаций и итераций (англ. Iteration – повторение). Молодые лесные насаждения

(лесовозобновления на вырубках, гарях, лесные культуры) объединялись в один класс, в связи со сложной интерпретацией их видового состава на спутниковом снимке Landsat.

Картографирование лесного покрова. Тематическая карта лесного покрова на исследуемую территорию Среднего Поволжья 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 классификации основан на оценке и сравнении критериев близости точек в пространстве признаков (Kim et al., 2014; Воробьев и др., 2014; Елсаков и др., 2009). В нашей работе приняты следующие параметры классификации: число классов – от 15 до 25, максимальное число итераций – 25, минимальный размер класса – 3 пикселя. Одна сцена спутникового снимка Landsat состояла в среднем из 3,145 миллионов пикселей.

Тематическая неуправляемая классификация проводилась в несколько этапов в соответствии с разработанной легендой наземного лесного покрова на 6 классов. Во время первого этапа спутниковый снимок Landsat классифицировался на 25 тематических классов, которые в дальнейшем были последовательно сгруппированы в более крупные классы: светлохвойные, мелколиственные и смешанные леса. В том случае, когда объекты местности невозможно было отнести к какому-либо из известных классов, для них создавалась отдельная векторная маска, для которой проводилась дополнительная неуправляемая переклассификация спутникового снимка на 15 тематических классов.

Для картографирования отдельных лесных участков старшего возраста, пройденных пожарами 2010 года, была проведена дополнительная классификация с использованием нормализо-

ванного индекса гарей (Normalized Burned Index, NBR) (Воробьев и др., 2014).

Для определения количественной оценки степени повреждения территории лесными пожарами был использован разностный индекс гарей ΔNBR (таблица 3.3), который вычислялся на основании разности индексов NBR, полученных на снимках Landsat ETM+ 2001 и 2011 гг. (до и после пожаров 2010 г.). Подобно NDVI нормализованный индекс гари NBR имеет диапазон значений от -1 до +1. В ненарушенных лесных насаждениях этот показатель имеет положительные значения, на открытых и поврежденных пожарами участках – отрицательные.

Таблица 3.3 – Распределение тематических классов по степени повреждения лесного насаждения по значениям ΔNBR

№	Класс нарушений	$\Delta NBR \times 1000$	ΔNBR
1	Отсутствует	- 20 – (40)	- 0,19 до - 0,04
2	Низкий	50 - 290	- 0,05 до 0,29
3	Умеренный	300 - 490	0,03 до 0,45
4	Сильный	> 460	0,46 и выше

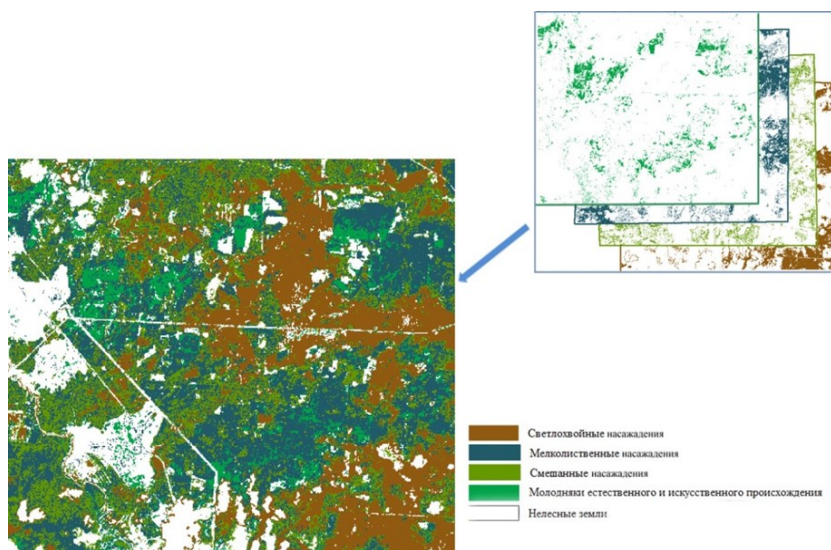
Значение NBR имеет тенденцию к снижению при увеличении степени поврежденности растительного покрова (Wagtendonk et al., 2004). Необходимым условием точности оценки значений ΔNBR в пределах тестового участка является выделение его для лесной страты, имеющей относительно однородные таксационные характеристики (состав, высота, полнота и степень повреждения пожаром).

Тематическое картографирование с последующим выделением масок гарей на территории исследования и классификацией площади лесных гарей по степени повреждения насаждений пожаром по четырем классам нарушенности древостоев было проведено в два этапа с использованием программного пакета ENVI-5.2. На первом этапе была применена неуправляемая классификация спутниковых изображений ISODATA. В результате этой классификации из мозаики сцен были выделены участки лесных гарей (в виде масок) на всю территорию исследования. Вся дальнейшая работа по определению классов нарушенности лесных насаждений проводилась по пороговым значениям ΔNBR и CBI (Composite Burn Index). Выделение классов нарушенности насаждений на изучаемой территории проводилось по пороговым значениям ΔNBR (таблица 3.3), которые для каждого тестового участка на снимке определялись на основе средневзвешенного значения центрального участка размером 3x3 пиксела.

Для полученных тематических карт на основе индекса гарей NBR были использованы мозаики 2001 и 2011 гг. мультиспектральных спутниковых снимков Landsat для территории республик Марий Эл и Чувашия, на основе которых получена базовая тематическая карта разностного индекса гарей ΔNBR .

Итоговые тематические карты представляли собой мозаику всех созданных масок на классы (рисунок 3.8).

Последовательное объединение (наложение друг на друга) сформированных классов-масок позволило получить итоговую растровую карту на изучаемую территорию. Каждая тематическая карта прошла процедуру генерализации, представляющую собой набор процедур «фильтрации» небольших групп «ложных» или непроклассифицированных пикселей, удаление, слияние или сглаживание объектов местности на спутниковом изображении (Andy, 2005).



**Рисунок 3.8 – Фрагмент мозаики тематической карты 2014 года
(на примере Килемарского лесничества РМЭ)**

Генерализация вновь разработанных тематических карт проходила в несколько этапов. На первом этапе применялся модуль «sieve» (устранение) для удаления отдельных пикселей или группы пикселей (составляющих не более 3 га), расположенных внутри полигона более крупного класса, не соответствующего ему. На втором этапе генерализации применялся модуль «majority» (скопление) для уточнения класса «ложных» пикселей на их соответствие более крупному классу, в котором они должны быть.

Пространственный анализ изменений в лесном покрове. Выявление изменений в лесном покрове исследуемой местности было основано на сравнении тематических классов наземного покрова между полученными картами за разные периоды времени (Полевщикова, Меньшиков, 2014).

Методика выявления изменений начинается с подготовки алгебраического формата (Алгебра карт) растровых данных спутникового изображения с использованием встроенного дополнительного модуля «Spatial Analyst» в программном пакете ArcGIS 10.3 (Childs, 2004).

На первом этапе работ этой части исследования происходило построение бинарных цифровых карт, когда каждому пикселю присваивается один из двух значений (кода): 0 – нелесной покров, 1 – лесной покров. Далее проводилось непосредственное наложение растровых наборов данных спутниковых изображений и формирование карты пространственного изменения (рисунок 3.9). Совмещение этих растровых данных позволяет получить общее представление об изменениях (нарушениях) в лесном пологе с течением времени. Оценка динамики наземного (лесного) покрова в пространстве на тематических картах выражается в виде увеличения, уменьшения или отсутствия изменений на исследуемом лесном и нелесном покрове.

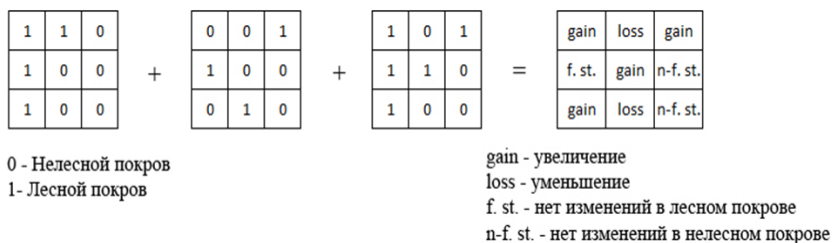


Рисунок 3.9 – Схема модуля растрового наложения «map algebra»

В нашем исследовании при проведении пространственно-временного анализа по данным спутниковых снимков Landsat в первом приближении основное внимание было уделено двум укрупненным (объединённым) тематическим классам наземно-

го покрова — «лесной покров» и «нелесной покров». Для этих целей использованы тематические карты, полученные по спутниковым снимкам Landsat (TM и ETM+) за 1985, 2001 и 2014 годы на территорию Среднего Поволжья. По этим данным была проведена основанная оценка пространственной нарушенности лесного покрова.

3.3.3. Маска класса «лесной покров»

Комплексная оценка нарушенности исследуемой территории Среднего Поволжья включала в себя дистанционный мониторинг состояния лесных гарей, вырубок, ветровалов и буреломов, еловых сухостоев и других нарушений в течение всего изучаемого периода времени (1985-2014 гг.).

Детальная оценка нарушенности наземного (лесного) покрова проводилась в пределах исследуемой сцены спутника Landsat p172r21 (см. таблицу 3.1), которая наиболее полно отражает исследуемые лесные территории Среднего Поволжья. Основная доля площадей лесных земель приходилась на северную часть этой исследуемой сцены.

Для оценки всех вышеперечисленных нарушений наземного (лесного) покрова местности естественного и антропогенного характера за разные промежутки времени была использована единая лесная маска. Она была получена путем объединения в программном пакете ArcGIS всех слоев лесных классов хвойных, лиственных, смешанных насаждений и молодняков в единый векторный файл.

Комплексная маска класса «Лесной покров» за 1985-2014 гг. создавалась с использованием дополнительного модуля «Mosaic» в программе ENVI 5.2.

Данный модуль представляет собой алгоритм последовательного наложения и объединения набора растровых данных (рисунок 3.10) в единую маску-класс.

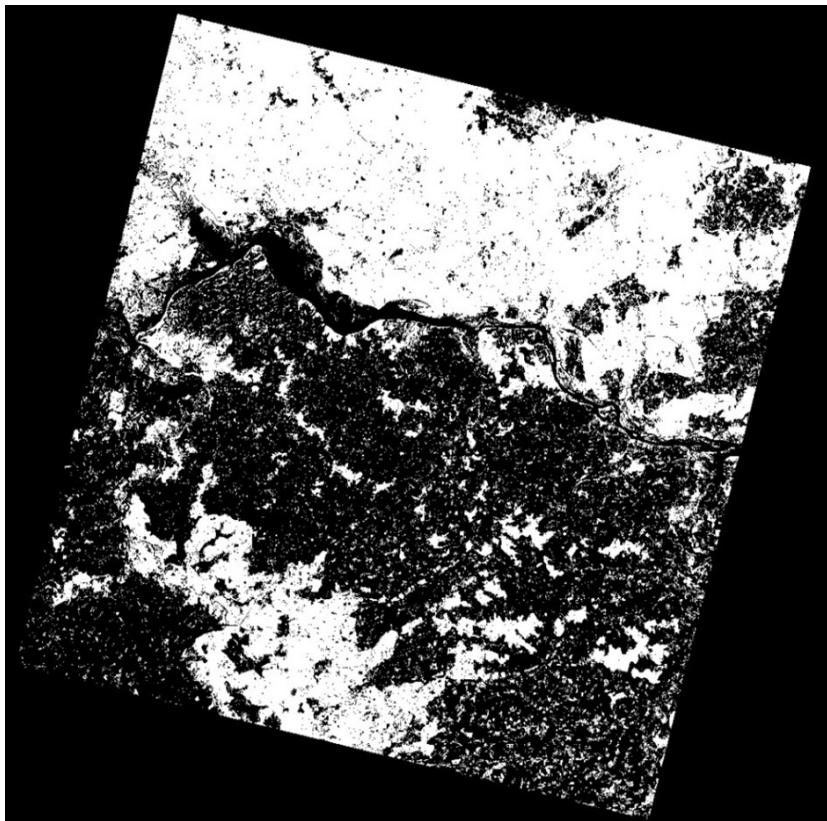


Рисунок 3.10 – Растровое изображение маски лесного покрова на спутниковом снимке Landsat

При этом исходные спутниковые данные должны обладать следующими схожими характеристиками:

- битовая глубина (цветовая характеристика пикселя),
- геометрическая привязка (данные должны находиться в одной системе координат),
- пространственное разрешение (размеры пикселя),
- размеры сцены (общее количество пикселей).

3.3.4. Оценка нарушенности лесного покрова

Выявление изменений в лесном покрове, связанных с антропогенной деятельностью и природными нарушениями, выступает одним из важных элементов работы при классификации спутниковых снимков (Yang et al., 2012). Хорошо известно, что спектральные характеристики нарушенных участков имеют схожие показатели с другими классами наземного покрова (Курбанов и др., 2011). Например, травянистый покров на спутниковых снимках по спектральным показателям подобен кустарниковой растительности. На спутниковых снимках Landsat они практически не различимы.

Для решения таких задач по разделению схожих тематических классов обычно проводят спектральное преобразование или детальное картографирование спутниковых изображений с целью повышения точности дешифрирования, о чем более подробно говорилось в первой главе работы.

В основу алгоритма для выявления изменений в лесном покрове на территории Среднего Поволжья была положена методика группы американских ученых под руководством профессора Nealy (2005). Предложенный нами в работе алгоритм позволяет повысить точность дешифрирования нарушенных участков (вырубки, пожары, ветровалы, буреломы, усыхание древостоев, повреждение болезнями) посредством применения к серии мультиспектральных разновременных спутниковых снимков Landsat на исследуемую территорию (рисунок 3.11) индекса нарушенности (Disturbance Index, DI), который рассчитывается по формуле

$$DI = Br - (Gr + Wr),$$

где Br, Gr и Wr – компоненты нормализации яркости преобразованного изображения Tasseled Cap «яркость», «зеленость» и «влажность» соответственно.

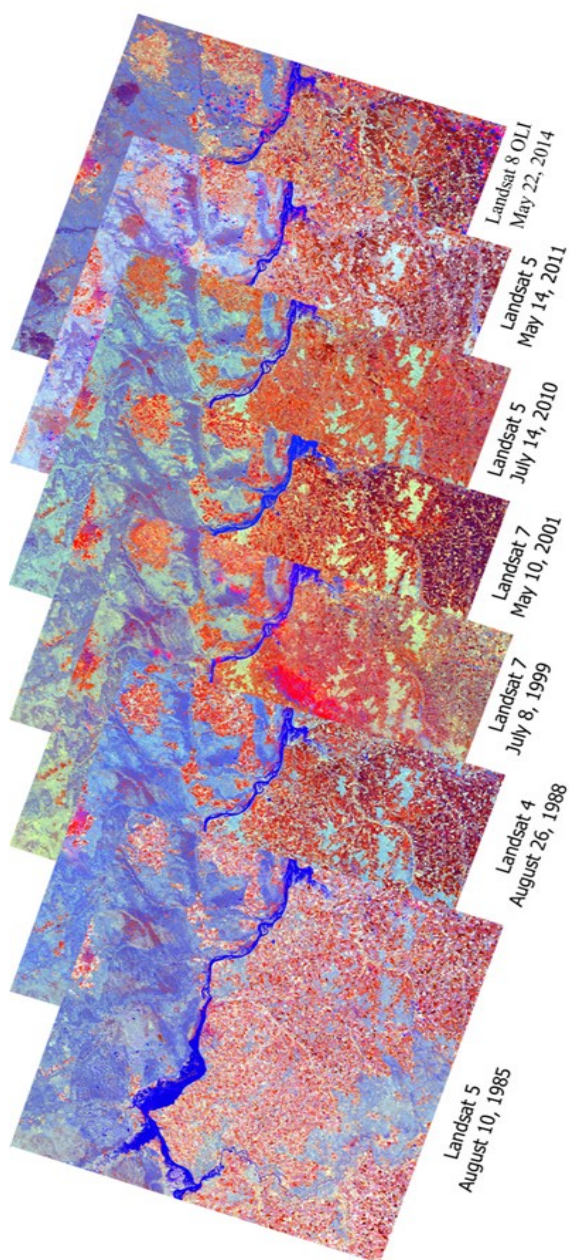


Рисунок 3.11 – Серия спутниковых изображений Landsat, преобразованных в Tasseled Cap

Комбинация ортогональных координат «зеленость» и «влажность» отражает спектральные характеристики лесной растительности, а «яркость» более соответствует нелесным участкам. Поэтому при расчете DI значения индекса яркости на участках с недавно нарушенным лесным покровом имеют более высокие значения, а индексы зелени и влажности соответственно более низкие значения (рисунок 3.12).

Индекс нарушенности DI используется для решения многих задач в области обнаружения изменений в растительном покрове (Полевщикова, Акбаров, 2013; Zhu et al., 2014). В исследовании он был применен к серии мультиспектральных спутниковых снимков для оценки маски лесного класса (рисунок 3.13).

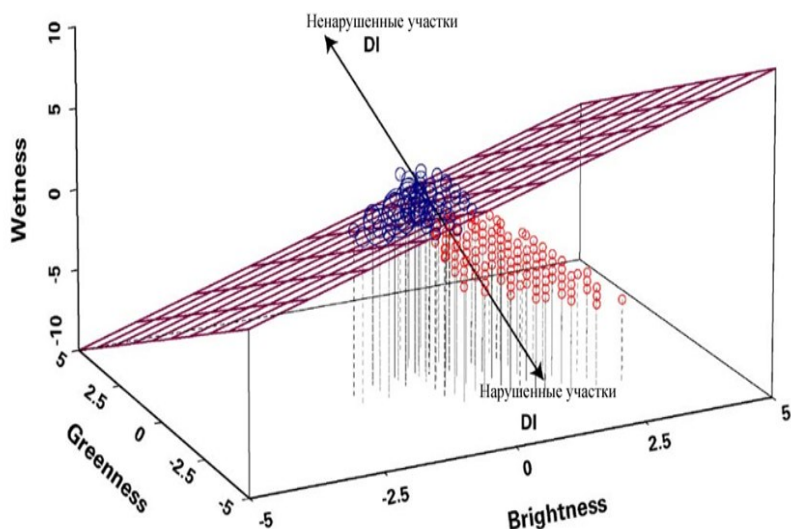


Рисунок 3.12 – Распределение индекса нарушенности DI в трехмерном пространстве признаков Tasseled Cap. Пиксели нарушенных участков представлены красным цветом, ненарушенные – синим

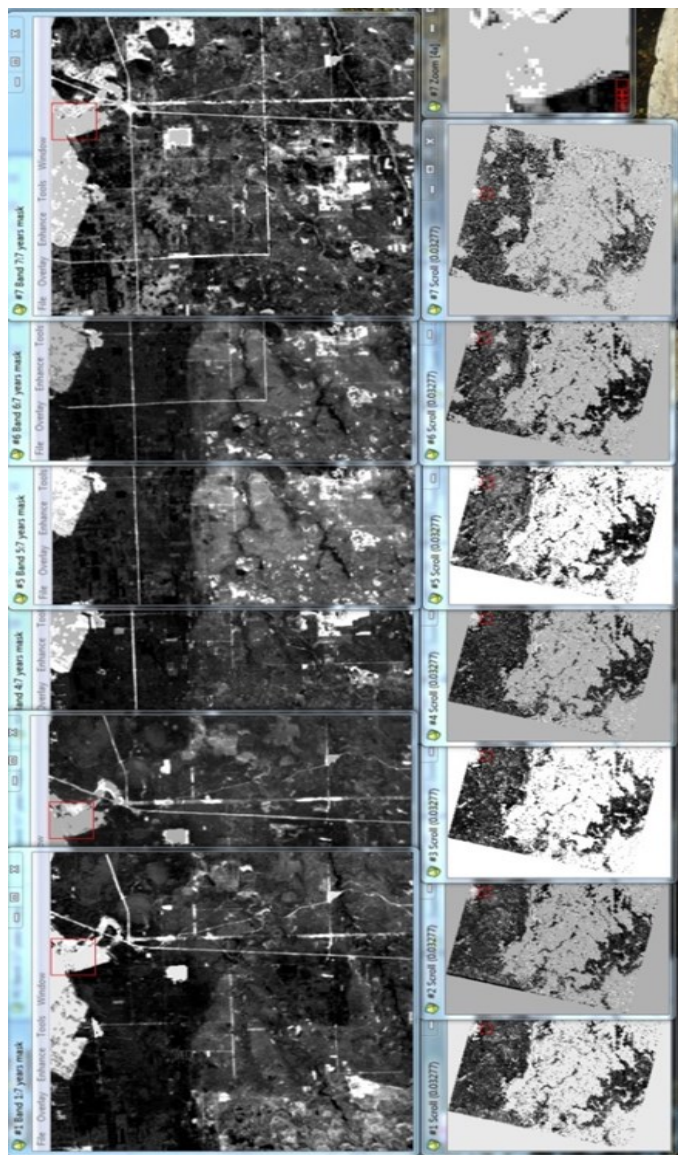


Рисунок 3.13 – Серия спутниковых разновременных снимков Landsat с маской класса Лес, используемая для определения DI

Комплексная оценка нарушенности исследуемой лесной территории Среднего Поволжья включала в себя дистанционный мониторинг лесных гарей, вырубок, буреломов, ветровалов, сухостоев и других нарушений в течение изучаемого периода (1985-2014 гг.).

Детальная оценка нарушенности наземного (растительного) покрова проводилась в пределах исследуемой сцены Landsat p172r21, которая наиболее полно охватывала исследуемые лесные территории, пораженные лесными пожарами (2010 года), рубками, усыханием хвойных (в первую очередь еловых) насаждений (Алексеев и др., 2006; Бровкина, 2011; Денисов и др., 2015). Основная часть площадей лесных земель приходилась на северную часть исследуемой сцены.

Оценка степени изменений границ нарушенных насаждений для каждого тематического лесного класса проводилась на основе обучающих выборок (Region of Interest, ROI), извлечённых на основе разработанных тематических классов из изображений спутниковых снимков Landsat. На исследуемой территории Среднего Поволжья для каждого оцениваемого периода были подобраны соответствующие полигоны лесных участков, которые подверглись тем или иным нарушениям в результате природной аномалии или антропогенной деятельности. Эти полигоны были использованы как для последующей управляемой классификации спутниковых изображений, так и для оценки точности тематического картографирования.

В качестве основы для дешифрирования (классификации) нарушенных участков в Среднем Поволжье были использованы их спектральные профили, получаемые при объединении серии спутниковых снимков за разные периоды времени (Ануфриев, 2010; Лежнин, 2011).

На рисунке 3.14 представлен график значений DI в динамике, показывающий изменения на участке леса, нарушенном в

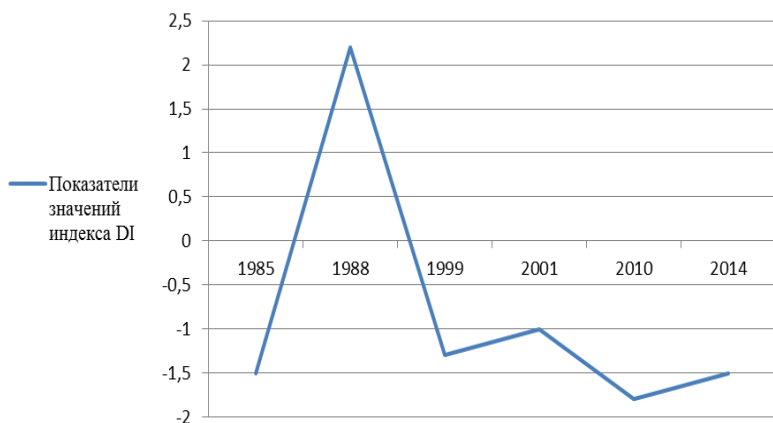


Рисунок 3.14 – График кривой значений DI для оценки нарушенных участков (кривая значений DI на нарушенном участке 1988 года)

результате сплошной вырубki 1988 года. Синтез разновременных изображений DI позволяет получать псевдоцветное растровое изображение в RGB, которое визуализирует пространство признаков нарушенных участков лесного покрова на спутниковых снимках Landsat (рисунок 3.15в). Красным цветом на изображении выделен участок, нарушенный в результате сплошной вырубki 1985 года, в то же время синим цветом обозначена вырубka 1999 года. Такая комбинация изображений DI позволяет визуально отслеживать изменения на лесном покрове.

Для оценки лесных участков, пройденных огнем, проведен анализ данных мультиспектральных спутниковых снимков среднего (Landsat) и высокого (Rapid Eye) разрешений.

На рисунке 3.16 показаны границы гарей в векторном виде, наложенные на территорию исследования. Динамика изменения выделенных участков также определялась на основе анализа и сравнения разновременных спутниковых снимков.

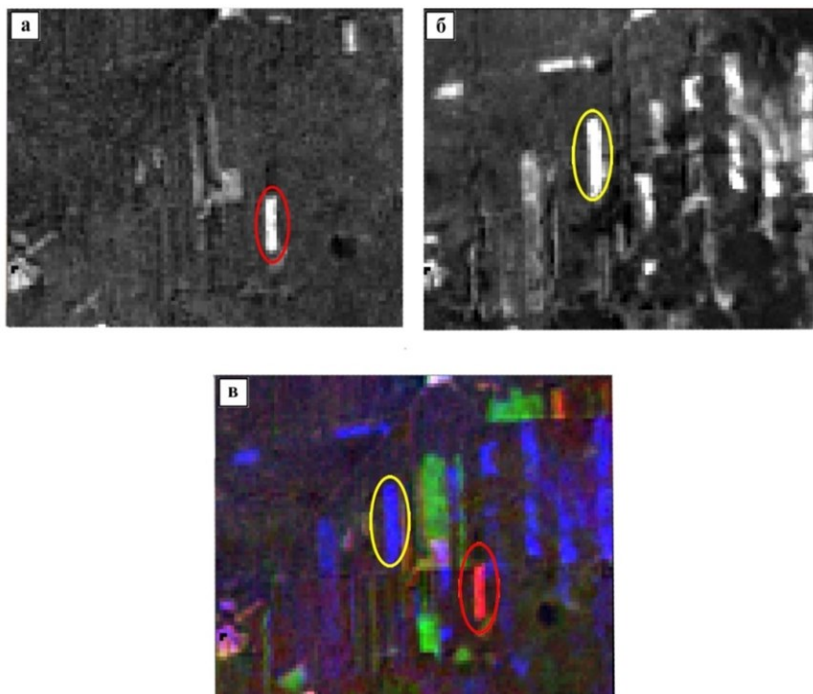


Рисунок 3.15 – Нарушенные участки леса на спутниковом снимке ДИ: а) ДИ 1985 г., б) ДИ 1999 г., в) синтезированное изображение по снимкам 1985, 1988 и 1999 г.

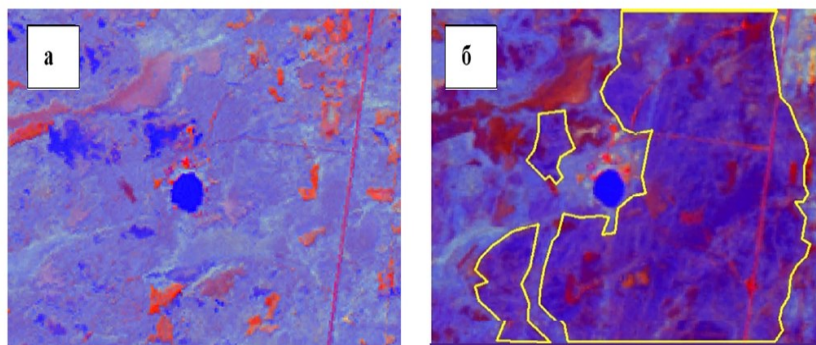


Рисунок 3.16 – Фрагмент изображений Landsat BGW: а) 2001 года, б) 2010 года с границами гарей

В результате экспертной оценки серии спутниковых снимков Landsat на территории исследований Среднего Поволжья (республик Марий Эл и Чувашии) по вновь полученным тематическим картам было выделено 90 нарушенных лесных участков и 100 участков лесного покрова, не затронутых изменениям за весь изучаемый период.

Создание тематической карты нарушенности проводилось в комплексном программном пакете ENVI методом управляемой классификации способом Maximum Likelihood (максимальное правдоподобие). Этот алгоритм позволяет оценить неизвестные параметры исследуемых объектов (классов) местности путем максимизации функции правдоподобия, основанной на данных сформированной обучающей выборки (классов легенды лесного покрова). Классификация представляет собой наложение созданного полигонального набора данных обучающей выборки на мультиспектральный композит серии спутниковых снимков (1985, 1988, 1999, 2001, 2010, 2011).

Оценка точности полученной тематической карты проводилась методом постклассификационной обработки данных, включающей:

- сравнение с наземными данными (эталонными участками),
- построение «матрицы неточностей» (Confusion Matrix),
- расчет общей точности и коэффициента Каппа (Курбанов и др., 2015).

Набор наземных тестовых данных осуществлялся во время полевых выездов сотрудников ЦУДМЛ ФГБОУ ВО «ПГТУ» (май-сентябрь) на лесные объекты и визуального обследования территории Среднего Поволжья. В качестве дополнительных материалов использовались материалы лесоустройства, планы лесонасаждений, спутниковые снимки высокого разрешения и Интернет-ресурсы.

3.3.5. Моделирование нарушенности лесного покрова

В нашем исследовании для моделирования и прогнозирования нарушений в лесном покрове изучаемой территории Среднего Поволжья был использован многофакторный регрессионный анализ (Multicriteria Decision Analysis), выполненный в среде программного комплекса ArcGIS. Комбинирование спутниковых изображений Landsat и классических статистических приемов позволяет провести пространственно-временной анализ взаимосвязи объектов наземного покрова, а также выявить и описать факторы, влияющие на нарушения лесов.

Такой многофакторный анализ позволяет разрабатывать и получать модели прогноза возможности повторения какого-либо неблагоприятного пространственного события (нарушения) в будущем (Eastman et al., 1999; Чумаченко и др., 2009). В конечном итоге, пространственно-временной анализ данных лесного покрова по разработанной методике может служить важной основой для принятия решений при планировании и проведении работ по защите, восстановлению и воспроизводству лесов.

В работе использован алгоритм оценки распределения и пространственной взаимосвязи (автокорреляции) объектов лесного покрова, полученный на основе многофакторного анализа зависимости интегрированного показателя нарушенности лесного покрова исследуемой территории от ее других пространственных параметров (Dorman, 2007).

Анализ проводился в программном комплексе ArcGIS в два этапа с помощью методов:

- 1) двумерного статистического анализа (Bivariate statistical analysis),
- 2) статистического многофакторного анализа пространственных данных с построением модели линейной множественной регрессии.

Для оценки и анализа пространственно-временной динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье были использованы следующие растровые данные, полученные ранее по спутниковым снимкам Landsat:

- карты лесных гарей 2010 г.,
- тематическая бинарная карта динамики растительного покрова за 1985 - 2014 гг.,
- тематическая карта нарушенности лесного покрова за 1985-2014 гг. (рубки, ветровалы, усыхание и т.п.),
- тематическая карта лесного покрова на исследуемую территорию 2014 г., полученная классификацией на 7 классов наземного покрова.

При оценке происходящих нарушений в лесном покрове также были использованы ситуационные карты, которые показывают изменения или их отсутствие на объектах исследуемой местности с течением времени.

Для получения данных и анализа лесного покрова на таких картах обычно используются три сценария:

- увеличение площади лесного покрова в связи с процессами лесовосстановления и зарастания земель запаса и перераспределения,
- снижение площади лесного покрова в результате влияния антропогенных (рубки) и природных (пожары, ветровалы, усыхание) факторов,
- без изменений в лесном покрове.

В нашей работе были использованы ранее полученные данные Центром устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов» ФГБОУ ВО «ПГТУ» - тематические карты с градацией на два класса: «лесной покров» и «нелесной покров». Класс «лесной покров» был сформирован в результате объединения семи генерализированных классов лесных насаждений на картах 1985, 2001 и 2014 гг. (рисунок 3.17).

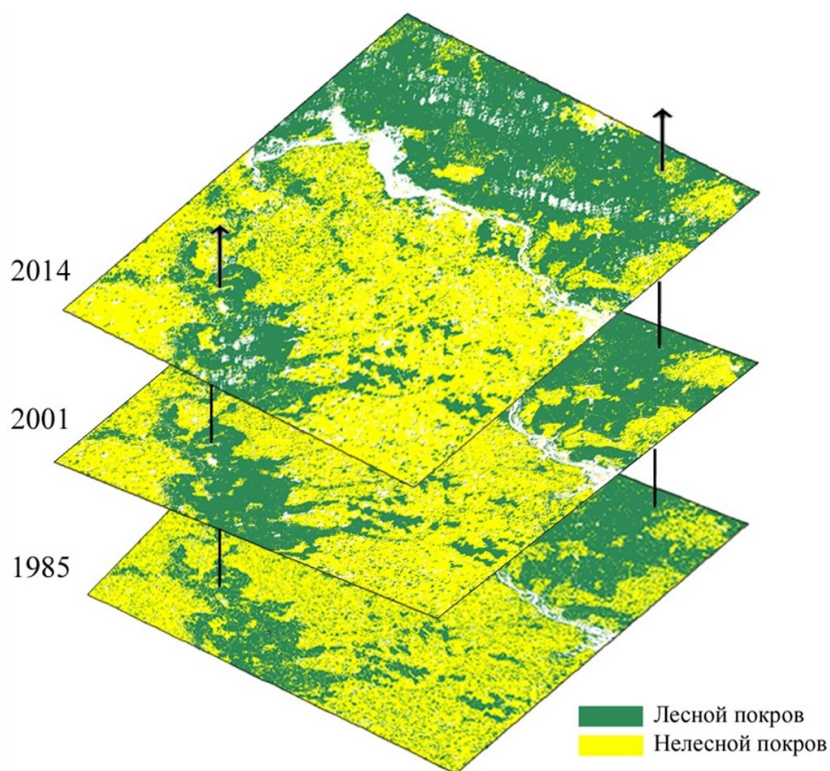


Рисунок 3.17 – Карты растительного покрова в Среднем Поволжье за 1985-2001-2014 гг.

Оценка динамики площади лесного покрова на тематических картах региона проводится на основе сравнения полученных двух классов: 0 – нелесной покров, 1 – лесной покров (таблица 3.4).

Для каждого исследуемого показателя рассчитывалась плотность пространственного распределения оцениваемого явления (фактора) и его весового коэффициента². С этой целью

² Весовой коэффициент – числовой параметр, отражающий значимость, относительную важность, «вес» данного фактора, показателя в сравнении с другими факторами, оказывающими влияние на изучаемый процесс

для каждого оцениваемого явления была проведена процедура переклассификации изучаемых факторов с целью последующего определения градации их плотности.

Таблица 3.4 – Оценка пространственных изменений по классам (0 – нелесной покров, 1 – лесной покров)

1985 г.	2001 г.	2014 г.	Оценка
0	0	0	Площадь нелесного покрова без изменений
0	0	1	Увеличение площади лесного покрова
0	1	0	Уменьшение площади лесного покрова
1	1	1	Площадь лесного покрова без изменений
1	1	0	Уменьшение площади лесного покрова
1	0	0	Уменьшение площади лесного покрова
0	1	1	Увеличение площади лесного покрова
1	0	1	Увеличение площади лесного покрова

Методика оценки весомости исследуемого фактора (Weight of evidence, WoE) основана на правилах теоремы Байеса (или формулы Байеса) — одной из основных теорем элементарной теории вероятностей, которая позволяет определить вероятность какого-либо события (нарушение) при условии, что произошло другое статистически взаимозависимое с ним событие (Kahneman et al., 1982; Гмурман, 2005; Junttila, Laine, 2017). Теорема Байеса в последние годы нашла широкое применение в геопространственном анализе спутниковых данных, особенно после развития компьютерных и сетевых технологий.

Весовые показатели (W_j) того или иного оцениваемого фактора, влияющего на основное событие, по этой теореме определяются по следующим формулам (Bonham-Carter et al., 1994; Ranjan et al., 2008; Senf et al., 2017):

$$W_j^+ = \ln \frac{P\{B|A\}}{P\{B|\bar{A}\}}$$

$$W_j^- = \ln \frac{P\{\bar{B}|A\}}{P\{\bar{B}|\bar{A}\}}$$

где P – вероятность наступления события при истинности гипотезы; B – исследуемый признак (нарушенность,); $A(B)$ — площадь территории исследования; B – наличие потенциального предсказания события (нарушенность «высокая»); $\bar{B}$ – отсутствие потенциального прогноза события; A - наличие события (нарушений); $\bar{A}$ – отсутствие события (нарушенности).

В конечном итоге оценка бинарной карты динамики наземного (лесного) покрова проводится сравнением этих двух весовых коэффициентов. Положительное значение весового коэффициента (W_j^+) указывает на то, что предсказуемая переменная присутствует в местах нарушений, и величина этого веса является показателем положительной корреляции между наличием предсказуемой переменной и нарушением. Отрицательный вес (W_j^-) указывает на отсутствие предсказуемой переменной и показывает уровень отрицательной корреляции. Разница между двумя весами известна среди специалистов как степень различия (контраст) W_f ($W_f = W_j^+ - W_j^-$), которая показывает общую пространственную связь между предсказуемой переменной и событием (нарушение).

В работе предложена модель, которая представляет собой преобразованный вариант формулы Байеса, интегрированной для решения пространственных задач в среду ГИС.

Для оценки динамики происходящих пространственных изменений и получения тематических карт состояния природных территорий рассчитывается индекс соотношения частот пространственных взаимосвязей (Frequency ratio, FR) (Bonham-Carter, 1994). Этот индекс определяется отношением вероятности наступления оцениваемого события к его отсутствию и рассчитывается следующим образом:

$$FR = \frac{\frac{N_{pix}(SX_j)}{\sum_{j=1}^m SX_j}}{\frac{N_{pix}(X_i)}{\sum_{j=1}^n N_{pix}(X_j)}} ,$$

где $N_{pix}(SX_j)$ – количество выявленных пикселей оцениваемого события (нарушенность) в классе i для независимой переменной X ; $\sum SX_j$ – сумма пикселей всего класса i ; $N_{pix}(X_j)$ – количество пикселей существующих независимых параметров X_j ; m – количество категорий независимого параметра X_i ; n – общее число независимого параметра на всей территории, $\sum N_{pix}(X_j)$ – сумма пикселей всех классов.

Интегрированная карта нарушенности была получена на основе бивариантного статистического анализа растровых данных (Bivariate Statistical Analysis, BSA) (Jebur et al., 2015). Для этого был использован простой алгоритм геопространственного анализа тематических данных, позволяющий определить степень корреляции между выявленными нарушениями лесного покрова и другими факторами, влияющими на эти нарушения.

Тематические карты таких факторов формировались индивидуально на основе априорных данных и данных экспертного анализа (Malczewski, 1996; Malczewski, 2006).

Алгоритм работ по пространственно-временному анализу и разработке карты состояния лесного покрова данного исследования представлен на рисунке 3.18.



Рисунок 3.18 – Алгоритм разработки ситуационной карты

Анализ нарушений лесного покрова по условным факторам

Для анализа степени нарушенности (или состояния) лесного покрова в исследуемом регионе Среднего Поволжья за 1985-2014 гг. были использованы следующие факторы среды:

- биотические:

- гари (нарушенные участки лесов в результате пожаров 2010 г.),

- растровые лесорастительные карты на территорию исследования, представленные 7 тематическими классами наземного покрова;

- комплексные (абиотические и биотические):

- тематическая карта нарушенности (Disturbance Index, DI), в которую вошли участки лесохозяйственной деятельности (контуры сплошных рубок) за 29-летний период, площади усыхающих древостоев, ветровалов и буреломов (гари 2010 года были исключены из этого слоя).

Для каждого из исследуемых факторов среды был проведен расчет степени его влияния («весовой коэффициент») на нарушенность лесного покрова по вышеприведенным формулам.

Пример расчета весового коэффициента для изучаемого фактора. Для определения весового коэффициента каждого оцениваемого фактора в исследовании был использован ранее полученный растровый тематический слой DI, из которого были исключены площади лесных гарей 2010 г. В этот слой вошли площади рубок за последние 29 лет, а также усыхающие древостои (сухостои), ветровалы и буреломы. На полученной карте представлены только два класса: 0 – фон, 1 – нарушенность (рисунок 3.19).

Оценка степени влияния весового фактора (коэффициента) (DI – 2 класса градации) на изменения, про-

изошедшие на исследуемой территории за 29 лет, проводилась в комплексном пакете ArcGIS. Для этого определялось попиксельное совпадение каждого класса тематической карты ДІ (2 класса) с каждым классом бинарной карты нарушений (БК, для разработанных 7 классов).

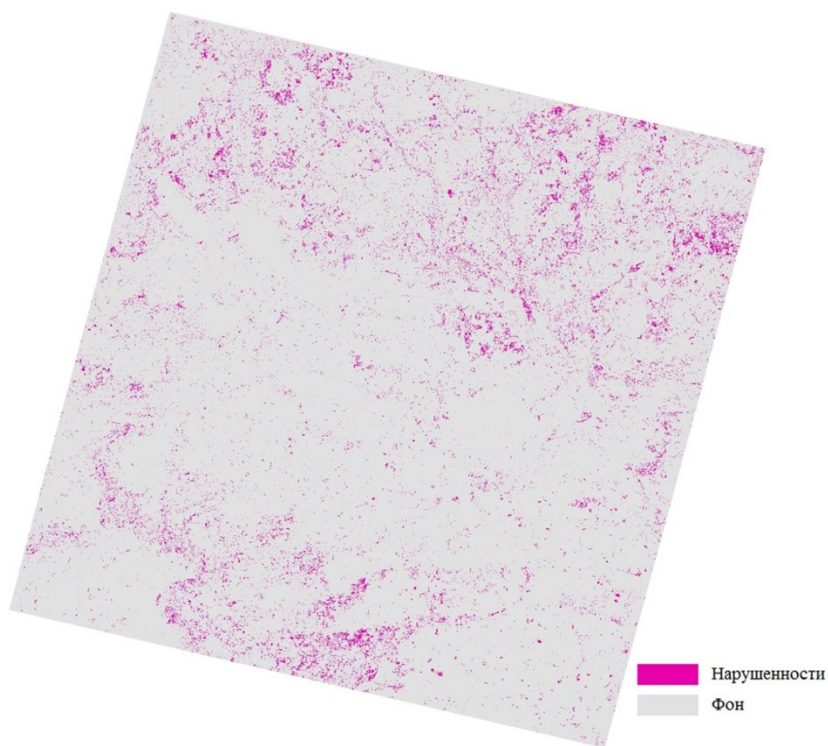


Рисунок 3.19 – Тематический кумулятивный растровый слой нарушений лесного покрова с 1985 по 2014 гг.

Таким образом, были получены данные по совпавшим пикселям слоя ДІ «класс 1» и слоя БК «класс 1». Такая процедура была проведена для всех изучаемых классов каждого тематического слоя (рисунок 3.20).

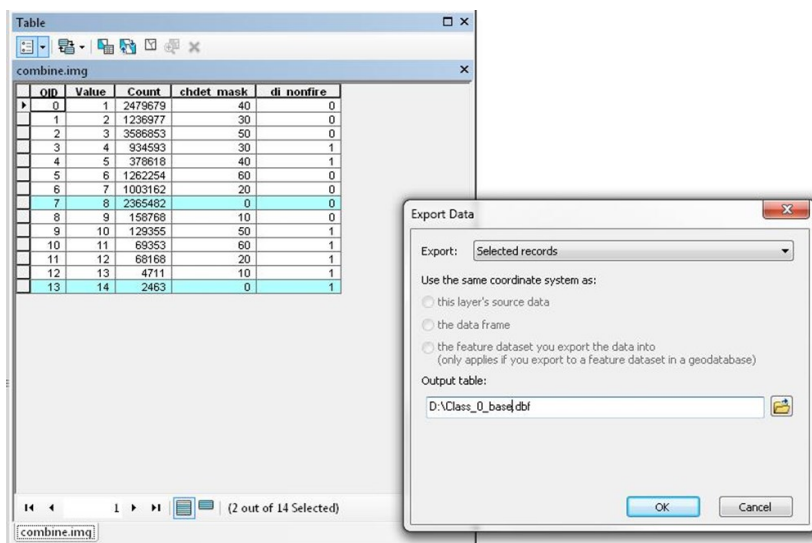


Рисунок 3.20 – Выделение класса «фон» в пакете ArcGIS бинарной карты (БК) для определения количества его пикселей

Далее в комплексном пакете ArcGIS был получен атрибутивный ряд данных, по которым рассчитывается и оценивается весовой коэффициент каждого исследуемого фактора, влияющего или не влияющего на нарушенность лесного покрова. В таблице 3.5 отражены: ID – номер класса исследуемого фактора; $\Sigma_{\text{пикс}}$ – число пикселей тематической карты DI за 29 лет (без слоя гари 2010); $\Sigma_{\text{совпикс}}$ – количество совпавших пикселей двух классов сравниваемых карт; $\Phi_{\text{пикс}}$ – соотношение количества пикселей класса исследуемого фактора к общему количеству пикселей сцены спутникового изображения; $C_{\text{пикс}}$ – отношение $n_{\text{slpix}}/n_{\text{cpix}}$ (n_{slpix} – количество пикселей, принадлежащих определенному тематическому классу; n_{cpix} – количество пикселей каждого класса карты DI за 29 лет); $\ln(C_{\text{пикс}}/\Phi_{\text{пикс}})$ – весовой коэффициент исследуемого фактора, рассчитанный для всей сцены изображения.

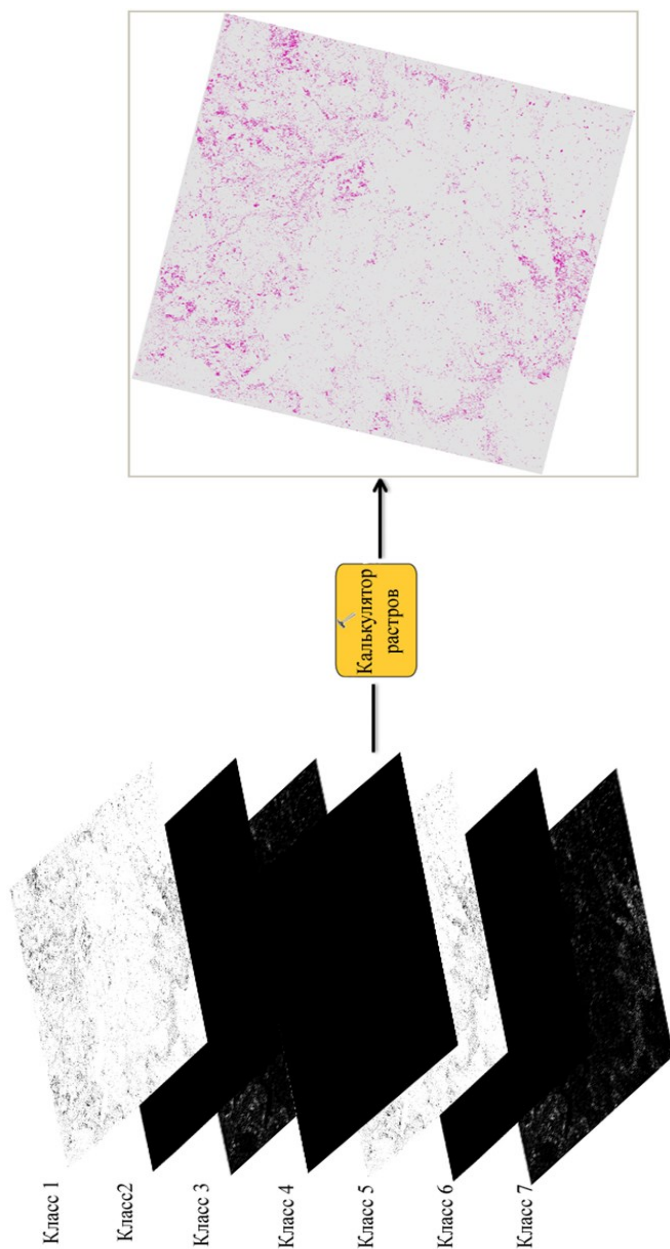
Таблица 3.5 – Данные сумм пикселей и весовых коэффициентов DI для двух классов бинарной карты нарушенности

ID	Класс	$\Sigma_{\text{пикс}}$	$\Sigma_{\text{совпикс}}$	$C_{\text{пикс}}$	$\Phi_{\text{пикс}}$	Вес
1	Class 0	34586262	2365482	0,068394	15,27633581	-2,349
2	Class 1	1587261	2463	0,001552	15,27633581	- 3,993 2

Полученные в работе весовые коэффициенты для каждого тематического класса изучаемого фактора нарушений (рисунок 3.21) интерполируются на всю сцену спутникового снимка Landsat и суммируются для получения итоговой растровой карты динамики и нарушенности лесного покрова Среднего Поволжья.

Подобные карты создаются отдельно для каждого изучаемого фактора (параметра). Процесс интерполяции каждого весового коэффициента на всю сцену спутникового снимка Landsat позволяет получить тематические карты растровых пространственных значений для всех факторов, влияющих на динамику и нарушенность лесного покрова. В дальнейшем все эти полученные данные интегрируются в одну результирующую карту, на основании которой дается комплексная оценка динамики и нарушенности лесного покрова на исследуемой спутниковой сцене Среднего Поволжья.

С целью повышения точности тематического картографирования и проведения дальнейшего пространственно-временного анализа в среде комплексного пакета ArcGIS в работе после получения всех весовых коэффициентов для каждого оцениваемого параметра (фактора) проводится процедура переклассификации спутниковых данных.



**Рисунок 3.21 — Получение растровых карт для каждого класса изучаемого фактора
(на примере Disturbance Index)**

3.3.6. Пространственно-статистический анализ динамики лесного покрова

Для пространственно-статистического анализа была подготовлена итоговая интегрированная карта динамики нарушения лесного покрова в векторном виде. В эту карту были также включены дополнительные атрибутивные данные всех исследуемых факторов, которые были получены в ArcGIS по вершинам центроидов всех полигонов итоговой векторной карты нарушений.

В итоге была получена база данных для оценки и моделирования влияния различных факторов на динамику лесного покрова за исследуемый период времени (рисунок 3.22).

Table



Polygon_for_GWR

	FID	Shape	Ann	Leec	Leec	Weight	Green	ID	Di fire	X	Y
	0	Polygon	40	5	2,86636	187	0	0	0	578678,602947	6304786,20977
	1	Polygon	40	5	2,86636	196	1	0	0	578943,636333	6304783,22543
	2	Polygon	40	5	2,86636	205	2	0	0	579157,216229	6304708,88135
	3	Polygon	40	4	2,85628	197	3	0	0	578978,602947	6304666,20977
	4	Polygon	40	5	2,86636	210	4	0	0	579518,345145	6304665,17386
	5	Polygon	40	4	2,85628	211	5	0	0	578917,216229	6304618,88135
	6	Polygon	40	5	2,86636	217	6	0	0	579050,086938	6304639,82123
	7	Polygon	40	5	2,86636	178	7	0	0	579098,602947	6304576,20977
	8	Polygon	30	5	3,85413	195	8	1	0	579846,052037	6304586,61418
	9	Polygon	40	5	2,86636	190	9	0	0	579458,602947	6304546,20977
	10	Polygon	30	6	3,85193	181	10	1	0	579879,833416	6304544,97869
	11	Polygon	40	5	2,86636	209	11	0	0	580156,669058	6304534,78355
	12	Polygon	40	4	2,85628	189	12	0	0	579489,833416	6304514,97869
	13	Polygon	40	5	2,86636	184	13	0	0	579576,487469	6304540,62803
	14	Polygon	40	5	2,86636	201	14	0	0	578883,512615	6304503,41382
	15	Polygon	40	5	2,86636	211	15	0	0	579068,602947	6304486,20977
	16	Polygon	40	5	2,86636	202	16	0	0	579307,216229	6304468,88135
	17	Polygon	40	5	2,86636	213	17	0	0	579386,913101	6304521,62299
	18	Polygon	40	6	2,86416	165	18	0	0	580181,948895	6304490,56043
	19	Polygon	40	5	2,86636	202	19	0	0	580259,43435	6304486,891
	20	Polygon	40	4	2,85628	195	20	0	0	580327,025799	6304455,59423
	21	Polygon	40	5	2,86636	203	21	0	0	579549,854168	6304440,84699
	22	Polygon	30	5	2,86636	195	22	0	0	579808,602947	6304424,97869
	23	Polygon	40	5	2,86636	186	23	0	0	580116,487469	6304450,62803
	24	Polygon	40	7	2,85821	174	24	0	0	580298,602947	6304424,97869
	25	Polygon	40	4	2,85628	202	25	0	0	578957,46601	6304413,06532
	26	Polygon	30	5	2,86636	204	26	0	0	580003,992352	6304397,8053
	27	Polygon	40	4	2,85628	183	27	0	0	580149,833416	6304394,97869
	28	Polygon	40	5	2,86636	216	28	0	0	578889,218182	6304365,59423
	29	Polygon	40	4	2,85628	209	29	0	0	579039,833416	6304364,97869
	30	Polygon	40	5	2,86636	208	30	0	0	579168,623394	6304413,80536
	31	Polygon	40	5	2,86636	195	31	0	0	579460,967449	6304379,02463
	32	Polygon	40	5	2,86636	202	32	0	0	579715,788006	6304367,34464
	33	Polygon	40	4	2,85628	210	33	0	0	580324,785114	6304374,65201
	34	Polygon	40	6	2,86416	179	34	0	0	578574,062719	6304377,29015
	35	Polygon	40	4	2,85628	198	35	0	0	578813,965496	6304364,95824
	36	Polygon	30	5	2,86636	202	36	0	0	579339,833416	6304334,97869



(0 out of 15162 Selected)

Polygon_for_GWR

Рисунок 3.22 – Матрица показателей факторов в среде ГИС

В полученной матрице атрибутивных данных (таблица 3.21) в качестве зависимой переменной был принят интегрированный показатель нарушенности лесного покрова «Дин_Лес». В качестве независимых факторов, которые могут оказать влияние на пространственно-временную динамику лесного покрова, приняты:

- данные тематической карты лесного покрова 2014 г. «Лес» (F) с градацией с 0 по 7 класс (0 – фон, с 1 по 7 – классы лесного покрова);
- данные весовых коэффициентов, полученных по интегрированной карте нарушенности – «Вес» (W_i);
- данные тематической карты нарушенности 1985-2014 гг. – «Нарушенность» (B_i) с градацией на 8 классов (0 – фон, с 1 по 7 – данные площадей нарушенных лесных классов за разные промежутки времени, 8 – площадь «гарей 2010 года»);
- растровые данные тематического слоя «Яркость» (*англ. Brightness*), который обычно характеризует спектрально-отражательные свойства (характеристики) объектов наземного покрова (B_r);
- цифровая модель рельефа (ЦМР) (*англ. Digital elevation model*), данные которой представлены проектом SRTM (*англ. The Shuttle Radar Topography Mission*) (SRTM, 2015) в виде матриц с размером ячейки (шагом решетки) 30 метров в проекции WGS-84 на территорию исследования (рисунок 3.23).

Изучаемая территория Среднего Поволжья на сцене Landsat существенно различается по своей пространственной структуре. Нижняя (южная) часть спутникового изображения в основном представлена фрагментированными лесными участками, граничащими с открытыми ландшафтами, включающими в себя нелесные земли (обрабатываемые сельскохозяйственные

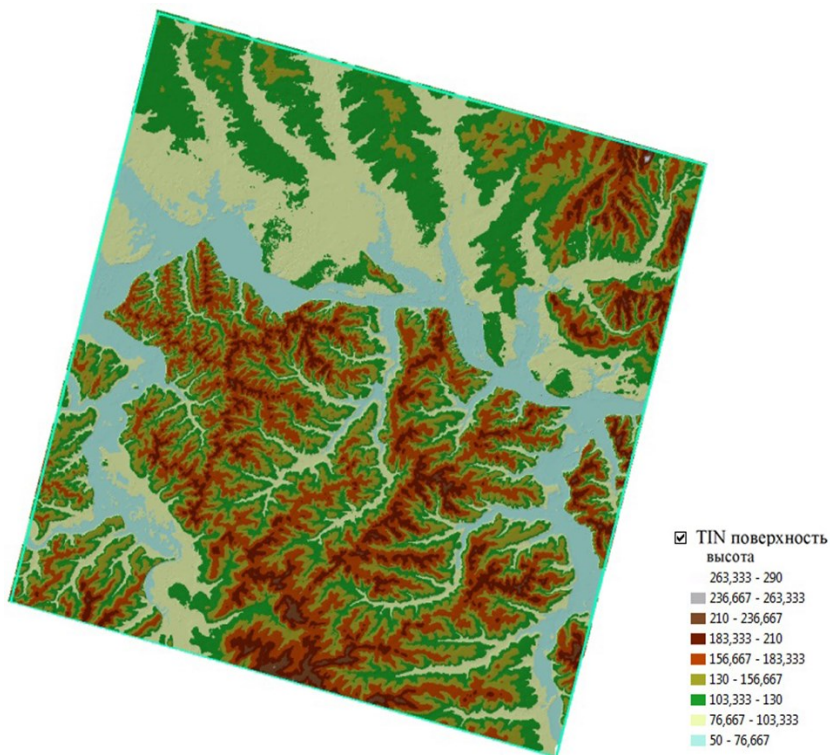


Рисунок 3.23 – Модель ЦМР поверхности территории исследования в виде нерегулярной триангуляционной сети (Triangular Irregular Networks – TIN)

угодья, зарастающие древесной растительностью бывшие сельскохозяйственные земли и т.п.). Верхняя часть спутникового изображения, охватывающая значительную часть Марийского Заволжья, представлена в основном лесной территорией. В связи с этим и во избежание получения избыточной пространственной автокорреляции, пространственно-временной анализ динамики лесного покрова проводился в исследовании только для фрагмента северной части снимка (№1 на рисунке 3.23).

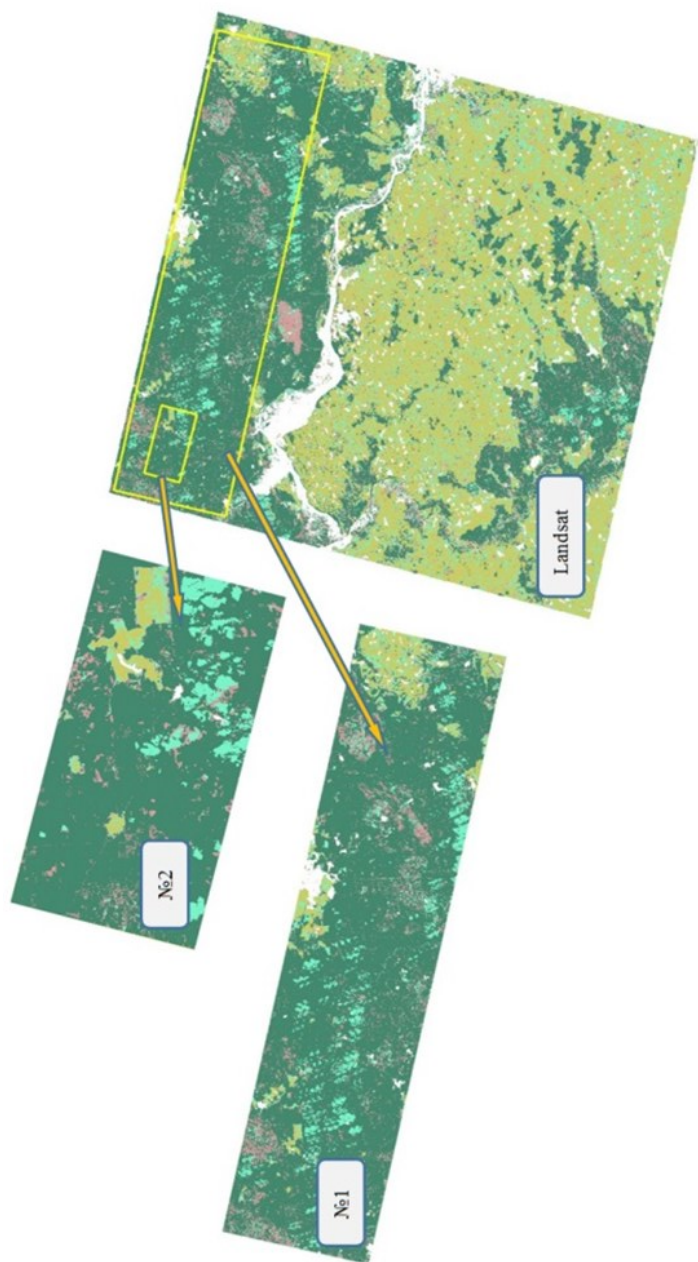


Рисунок 3.23 – Карта динамики растительного покрова и участки №1 и №2, на которых проводился пространственный анализ на глобальном и локальном уровнях

Для детального анализа на локальном уровне были рассмотрены несколько небольших фрагментов изучаемой сцены, для которых в дальнейшем были построены модели. ЦМР была использована только для небольших фрагментов сцены.

Для решения задачи по оценке пространственных закономерностей динамики лесного покрова в Среднем Поволжье в исследовании была использована методика географически взвешенной регрессии (ГВР), учитывающая территориальные изменения (Fotheringham et al., 2002; Andy, 2005; Gao, 2011; Mennis, 2006; Хлюстов и др., 2013; Шалабанов и др., 2008).

ГВР предшествует анализ регрессионных моделей, полученных методом наименьших квадратов (МНК). Все работы были выполнены в программном пакете ArcGIS 10.3.

Для лучшего понимания критериев и показателей, используемых в пространственно-статистическом анализе, приведем их подробное описание в этой части работы:

- SD – стандартная ошибка среднего;
- t-критерий Стьюдента;
- VIF (Variance Inflation Factor) – фактор, увеличивающий дисперсию;
- статистика Вальда (тест Вальда) – статистический тест, используемый для проверки ограничений на параметры статистических моделей, полученных на основе выборочных данных. Если эта статистика больше критического значения критерия Пирсона при данном уровне значимости, то гипотеза об ограничениях отвергается в пользу модели без ограничений («длинная модель»). В противном случае ограничения могут иметь место, и лучше построить модель с ограничениями, называемую «короткой моделью» (Магнус и др., 2004);
- статистика Кенкера (стьюдентизированная Кенкером статистика Бреуша-Пагана) – это тест на определение

того, имеют ли независимые переменные в модели постоянную связь с зависимой переменной как в географическом пространстве, так и в пространстве данных. Если модель согласована в географическом пространстве, то процессы, представленные независимыми переменными, ведут себя одинаково по всей области исследования (являются стационарными). Если модель согласована в пространстве данных, то разница в отношениях между прогнозируемыми значениями и каждой независимой переменной не меняется при изменении самой переменной (в модели нет гетероскедастичности) (Watson and Teelucksingh, 2002);

- статистика Жака-Бера (Jarque-Bera) – это тест, проверяющий ошибки наблюдений на нормальность посредством сравнения их третьего момента (асимметрия) и четвёртого момента (эксцесс) с моментами нормального распределения. Если ошибки распределены нормально, то в соответствии с теоремой Гаусса-Маркова оценки метода наименьших квадратов будут лучшими (иметь наименьшую дисперсию в классе линейных несмещённых оценок), и коэффициенты регрессии будут также распределены асимптотически нормально;
- информационный критерий Акаике (AIC) применяется исключительно для выбора из нескольких статистических моделей. В эконометрике принято, что наилучшей будет модель с наименьшим значением критерия AIC (McQuarrie and Tsai, 1998; Wainwright, 2013; Шалабанов и Роганов, 2008).

Пространственная автокорреляция модели оценивается с помощью индекса Морана (I) для невязок (сумма квадратов отклонений) регрессии, чтобы убедиться, что они пространственно случайны. Статистически значимая кластеризация высоких

и/или низких невязок (пере- или недооценка модели) показывает, что в модели потеряна основная переменная (ошибка спецификации). В таком случае данные метода наименьших квадратов не могут считаться достоверными (Дрейпер и Смит, 2007). Индекс I Морана для нормально распределенных данных лежит в диапазоне от -1 до 1:

+1 показывает детерминированную прямую зависимость (группировку схожих значений);

0 свидетельствует об абсолютно случайном распределении (CSR — complete spatial randomness);

-1 означает обратную зависимость — идеальное перемешивание низких и высоких значений исследуемых явлений (объектов).

Выводы по главе 3

Разработана комплексная методика пространственно-временного анализа нарушенности (изменения) лесного растительного покрова на территории Среднего Поволжья с использованием серии спутниковых снимков среднего разрешения Landsat за 30-летний период времени (1985-2014 гг.). Предлагаемая нами методика состоит из такой последовательности действий:

Закладка тестовых участков на территории лесничеств Республики Марий Эл и Чувашии для создания базы данных полевых исследований. Тестовые участки должны быть заложены на площадях лесных насаждений методом круговых реласкопических площадок. Все данные, в том числе, данные сгоревших участков лесных площадей, вносятся в учетные ведомости для дальнейшей обработки и анализа лесного покрова по спутниковым снимкам Landsat.

Подготовка семи мультиспектральных спутниковых снимков Landsat на территорию исследования (1985, 1988, 1999,

2001, 2010, 2011, 2014). Спутниковые снимки прошли процедуры выравнивания и трансформации: атмосферную, радиометрическую и геометрическую коррекции для устранения искажений. Для линейного выравнивания показателей спектральных характеристик наземного покрова каждый спутниковый снимок, полученный в разные вегетационные месяцы, был преобразован в Tasseled Cap.

Создание легенды тематических карт лесного растительного покрова. Проводится оценка данных полевых исследований и материалов лесоустройства для определения основных классов лесных насаждений.

Формирование комплексного слоя лесного покрова за период 1985-2014 гг. Итоговый лесной класс представляет собой компиляцию лесных масок за 30-летний период времени, охватывающий все площади лесного растительного покрова.

Выявление и мониторинг нарушенных участков на территории лесных насаждений по спутниковым изображениям. Оценка измененных участков проводится с применением индекса нарушенности (Disturbance Index, DI).

Создание тематической карты нарушенности лесного растительного покрова на исследуемую территорию. На основе созданной обучающей выборки и скомпилированной серии спутниковых снимков проводится классификация управляемым методом.

Пространственно-временной анализ лесной растительности с учетом влияния социально-экономических факторов (социально-экономические условия региона, ландшафта). В работе приводится методика пространственно-временного анализа лесного растительного покрова на территории Среднего Поволжья, которая позволяет определить изменения лесной растительности и выявить участки, нарушенные в результате сплошных вырубок, усыхания древостоев и лесных пожаров. Полученные модели

взаимосвязи могут быть использованы для дальнейшего прогнозирования изменений в лесном покрове.

Для совершенствования методики по дешифрированию нарушенных участков лесного покрова ко всем временным изображениям применяется индекс нарушенности, с помощью которого хорошо прослеживаются изменения (нарушенности). Данный вид трансформации изображений (Disturbance Index, DI) позволяет с наибольшей точностью определить участки, нарушенные под воздействием антропогенного или природного характера.

Классификация серии спутниковых изображений проводится с использованием управляемого способа Maximum Likelihood (максимальное правдоподобие), который позволяет определять границы изменения в пределах лесного класса за 30 лет.

Пространственно-временной анализ проводится на основе использования геостатистического пакета ПК ArcGIS, представляющего собой применение вариограммного анализа по модели кригинг. Кригингом включает пошаговый процесс, который состоит из статистического анализа данных, моделирования вариограммы, выявления статистической зависимости и создания поверхности интерполяции. Вариограмма моделируется на основе выбранной функции. Статистическая модель включает в себя анализ автокорреляции между данными.

Карты взаимосвязи, созданные на основе модели, представляют собой визуализацию данных с распределением границ низких и высоких пороговых значений коэффициентов, отражающих зависимости между социально-экономическими факторами и нарушением лесного покрова.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ ЛЕСНОГО ПОКРОВА

4.1. Формирование базы данных тестовых участков

В общей сложности в исследовании были использованы данные 1215 тестовых участков, из которых 720 – данные полевых исследований Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов ФГБОУ ВО «ПГТУ», 310 – данные лесоустройства и планов лесонасаждений, 185 – данные спутниковой съемки высокого разрешения (Интернет-ресурсы Google Earth, Yandex, спутниковые снимки ALOS, Rapid Eye, Ресурс-П и Канопус-В). Тестовые участки распределены равномерно на всей исследуемой территории и скомпилированы в единую базу данных ГИС «CSFM&RS-3.0» (рисунок 4.1) для мониторинга и оценки точности лесного покрова при тематическом картографировании территории республик Марий Эл и Чувашия на основе спутниковых изображений. Используемые в исследовании две база данных тестовых участков имеют свидетельство и государственную регистрацию в реестре баз данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности (приложения 1, 2).

В этой базе данных, сформированной на основе на основе комплексных пакетов ArcGIS и ENVI, собрана информация о таксационной и пространственной структуре древостоев и других объектах наземного покрова республик Марий Эл и Чувашии по данным полевых исследований ЦУДМЛ, результатам актуализации лесоустроительных материалов и дешифрирования спутниковых снимков разного пространственного разрешения. По этим данным можно определять текущие (на момент оценки) таксационные показатели древостоев, фактическое состояние объектов растительного покрова, проводить актуализацию (обновление) этих баз данных и использовать полигональ-

Тестовые участки представлены для 7 изучаемых классов лесного покрова в разновозрастных насаждениях светлохвойных, мелколиственных и смешанных пород (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Таксационные показатели древостоев тестовых участков

Тестовый участок	Состав	Средние таксационные показатели			
		А _{ср} , лет	Н _{ср} , м	Д _{ср} , см	Р _{отн}
№ 1	7Б2Ос1Е	70	27	24	0,7
№ 2	8Б2Ос	70	26	28	0,6
№ 3	8Б1Ос1Е	70	25	28	0,6

Полученная в исследовании база данных тестовых участков использована для решения задач по разработке тематических карт динамики наземного покрова, их валидации и оценки точности. Для тематического картографирования спутниковых изображений Landsat было использовано 80 % сведений созданной базы данных тестовых участков и 20 % – для оценки точности проведенных работ.

4.2. Тематические карты лесного покрова

В результате проведения неуправляемой классификации спутниковых снимков Landsat TM (ETM+) 1985, 2001 и 2014 гг. был сформирован картографический материал на исследуемую территорию Среднего Поволжья (приложения 3-5). На каждой тематической карте представлены 7 основных наземных (лесных) классов (страт), покрывающих территорию исследования (рисунок 4.2). Общая точность классификации составила 84 % при коэффициенте Каппа 0,82.

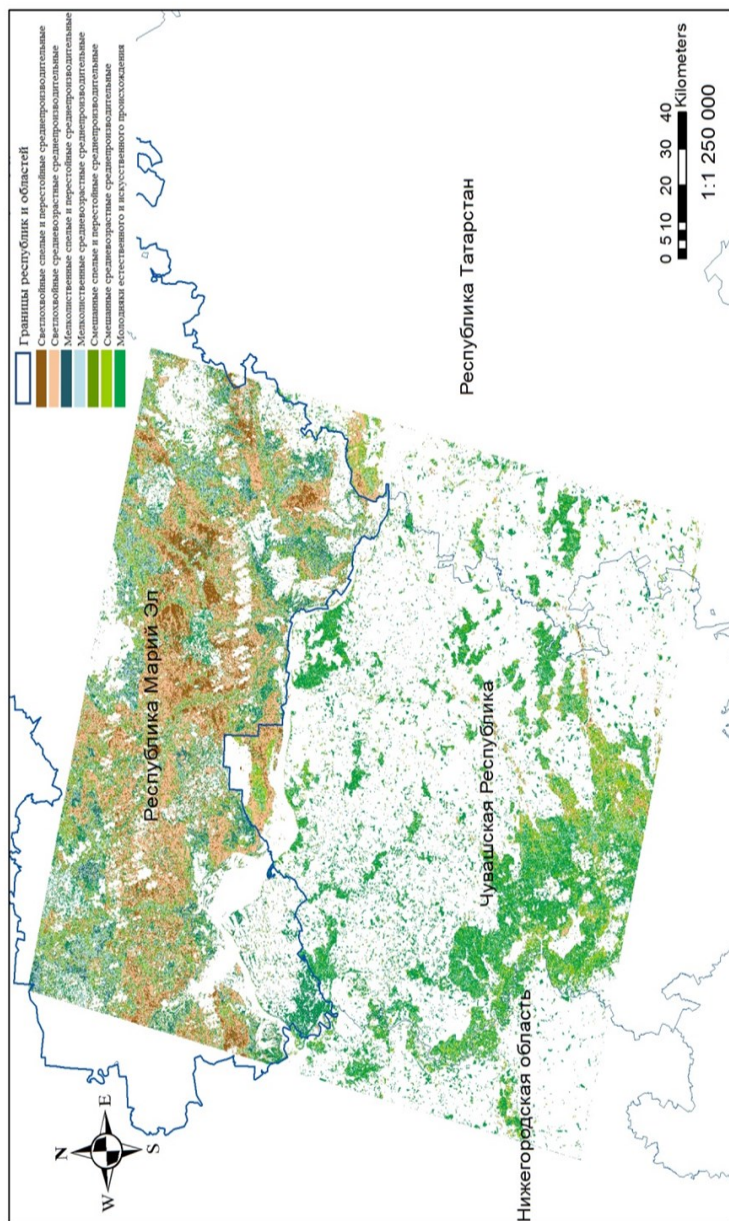


Рисунок 4.2 – Тематическая карта 2014 года распределения классов лесного покрова на территорию исследования

Сравнительная оценка распределения классов лесных насаждений для каждого растрового слоя тематической карты проводилась по их площади (таблица 4.2). Исследование показывает, что распределение лесонасаждений рассматриваемых тематических классов наземного (растительного) покрова носит неравномерный характер на всей исследуемой территории.

Среди изучаемых тематических классов наибольшую часть занимают светлохвойные насаждения (средневозрастные, спелые и перестойные), суммарная площадь которых в 2014 году составила 29 % от всей общей лесной территории исследования. Изменения по площади классов за 1985-2014 гг. наблюдаются во всех лесных насаждениях. В целом площадь класса мелколиственных насаждений («мелколиственные спелые и перестойные», «мелколиственные средневозрастные») уменьшилась на 19 %. В связи с переходом насаждений в другие тематические классы лесного покрова снижение класса смешанных насаждений к 2014 г. достигло 8 %. В то же время площадь светлохвойных насаждений на спутниковых изображениях Landsat существенно не изменилась за изучаемый период времени.

Динамику площадей лесных насаждений можно объяснить вырубкой лесов по достижении возраста рубки, влиянием лесных пожаров 2010 г., усыханием еловых древостоев и, как следствие, воздействием насекомых-вредителей и болезней лесных насаждений.

Тематический класс молодняков существенно увеличился за последние 29 лет на 23 % по сравнению с 1985 г. К данной категории были отнесены земли лесных гарей, свежих вырубок и бывших сельскохозяйственных угодий, на которых происходило естественное и искусственное лесовозобновление/лесовосстановление молодняками древесно-кустарниковых пород за исследуемый период времени.

Таблица 4.2 – Распределение классов лесного покрова на тематических картах 1985 - 2014 гг.

Наименование класса	Площадь класса		Площадь класса		Площадь класса	
	на карте 1985		на карте 2001		на карте 2014	
	га	Процент от лесной площади	га	Процент от лесной площади	га	Процент от лесной площади
Светлохвойные спелые и перестойные	1153815	6	2584263	15	1404082	9
Светлохвойные средневозрастные	3745388	19	2345377	13	3057244	20
Мелколиственные спелые и перестойные	2523885	13	3855961	22	614947	4
Мелколиственные средневозрастные	5707178	29	4055331	23	2899431	19
Смешанные спелые и перестойные	1231502	6	877076	5	1085250	7
Смешанные средневозрастные	4475676	23	1576702	9	2205389	14
Молодняки	1016727	5	2190270	13	4326107	28

Анализ динамики растительного покрова

В нашем исследовании на основе детально разработанного пошагового алгоритма действий по бивариантному тематическому картографированию лесной территории была проведена классификация методом Maximum Likelihood (максимальное правдоподобие) полученных тематических карт растительного покрова (рисунок 4.3).

Для исследования пространственно-временной динамики растительного (лесного) покрова на территории исследуемых республик Марий Эл и Чувашия за период 1985-2014 гг. проведен сравнительный анализ тематических слоев 1985, 2001 и 2014 гг., которые были совмещены в комплексном пакете ArcGIS функцией растровой алгебры (Полевщикова, Демишева, 2015). Полученная карта (рисунок 4.4) отражает распределение тематических классов на изучаемой территории Среднего Поволжья: площадь лесного покрова без изменения, его расширение или снижение в течение исследуемого периода времени, а также площадь нелесного покрова (приложение 6).

В целом данные сравнения тематических карт (рисунок 4.5) показали уменьшение лесного покрова по площади на 7,45 % с 1985 по 2014 гг. Причинами таких изменений стали рубки промежуточного пользования и сплошные вырубki лесных насаждений по достижении возраста спелости, значительные площади лесных пожаров 2010 г., усыхания еловых древостоев., ветровалы и буреломы.

В то же время увеличение площади лесного покрова на исследуемой территории Среднего Поволжья на 11,38 % можно объяснить процессами активного лесовозобновления на свежих вырубках, лесных гарях, зарастания земель сельскохозяйственных угодий молодой лесной древесно-кустарниковой растительностью (Курбанов и др., 2011), а также создания лесоплантационных культур на нарушенных землях.

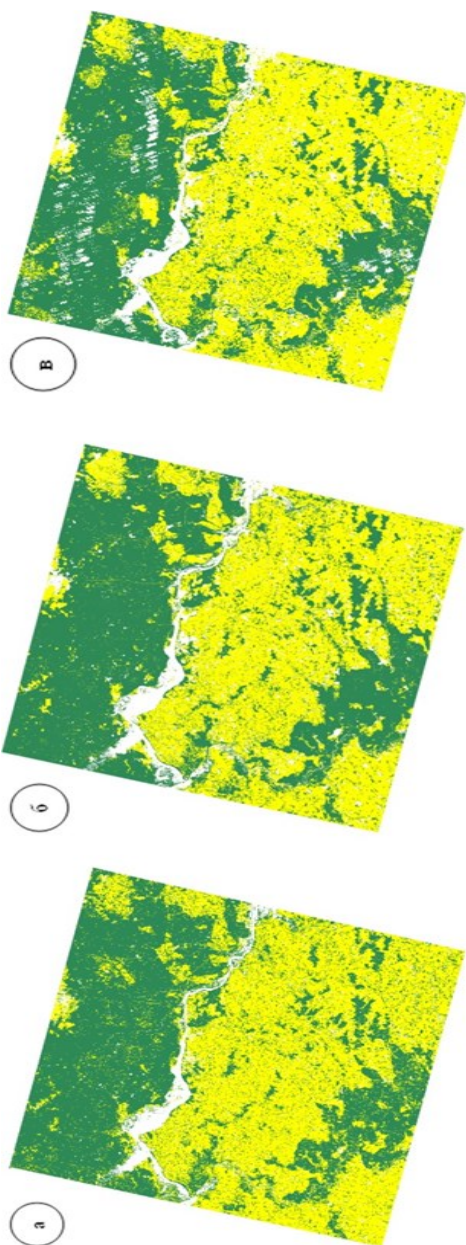


Рисунок 4.3 – Тематические карты растительного покрова исследуемой территории, полученные на основе спутниковых снимков Landsat: а) 1985 г., б) 2001 г., в) 2014 г.

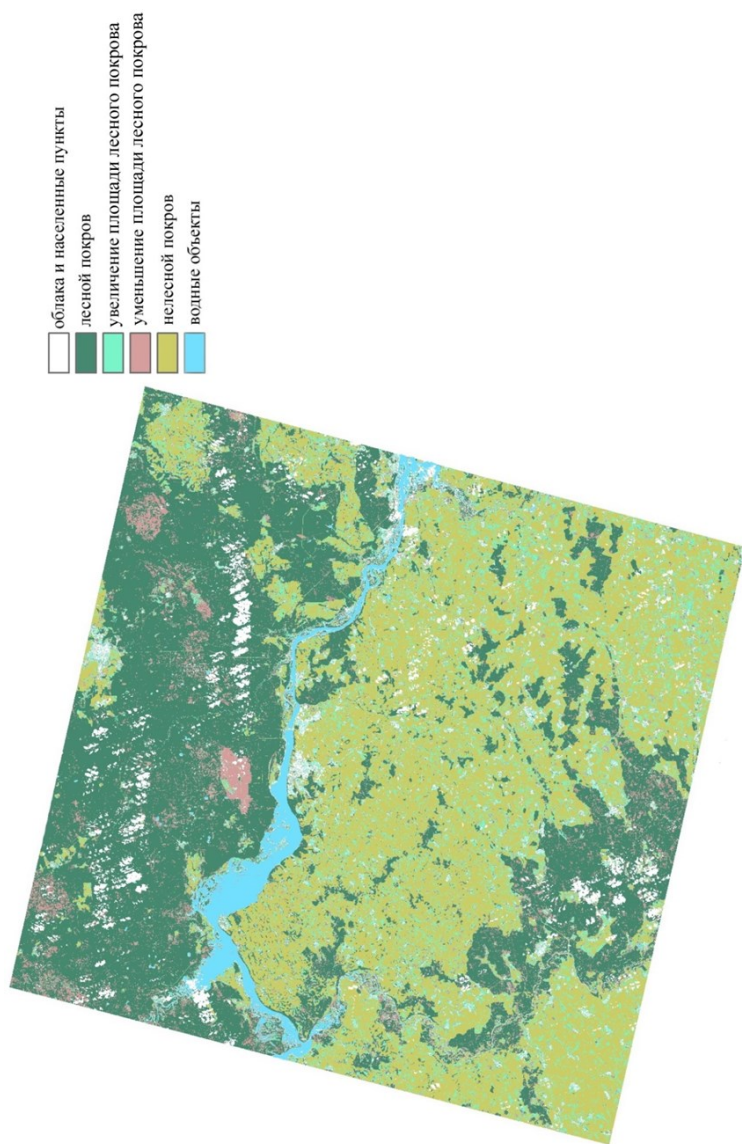


Рисунок 4.4 – Карта динамики растительного покрова за период с 1985 по 2014 гг.

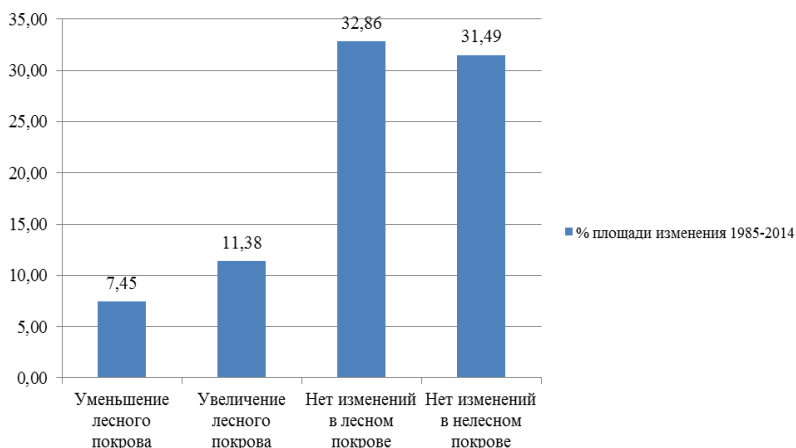


Рисунок 4.5 – График изменений площади классов лесного покрова в Среднем Поволжье за 1985-2014 гг.

Различия в распределении динамики лесного покрова были выявлены на уровне отдельных районов Республики Марий Эл (рисунок 4.6), в которых лесные насаждения имеют разную степень однородности и представленности. Следует отметить, что за исследуемый 29-летний период в республике значительные снижения по площади лесного покрова наблюдаются на тематических картах в Килемарском, Моркинском и Медведевском районах.

В то же время результаты нашего исследования показывают увеличение площадей лесных массивов в Волжском, Звениговском и Моркинском районах Республики Марий Эл. На территории данных районов значительная часть земель занята сельскохозяйственными угодьями. Исторически в районе Среднего Поволжья эти земли подвергались серьезным нарушениям в связи с антропогенной деятельностью (зарастания молодняками) и природными нарушениями.

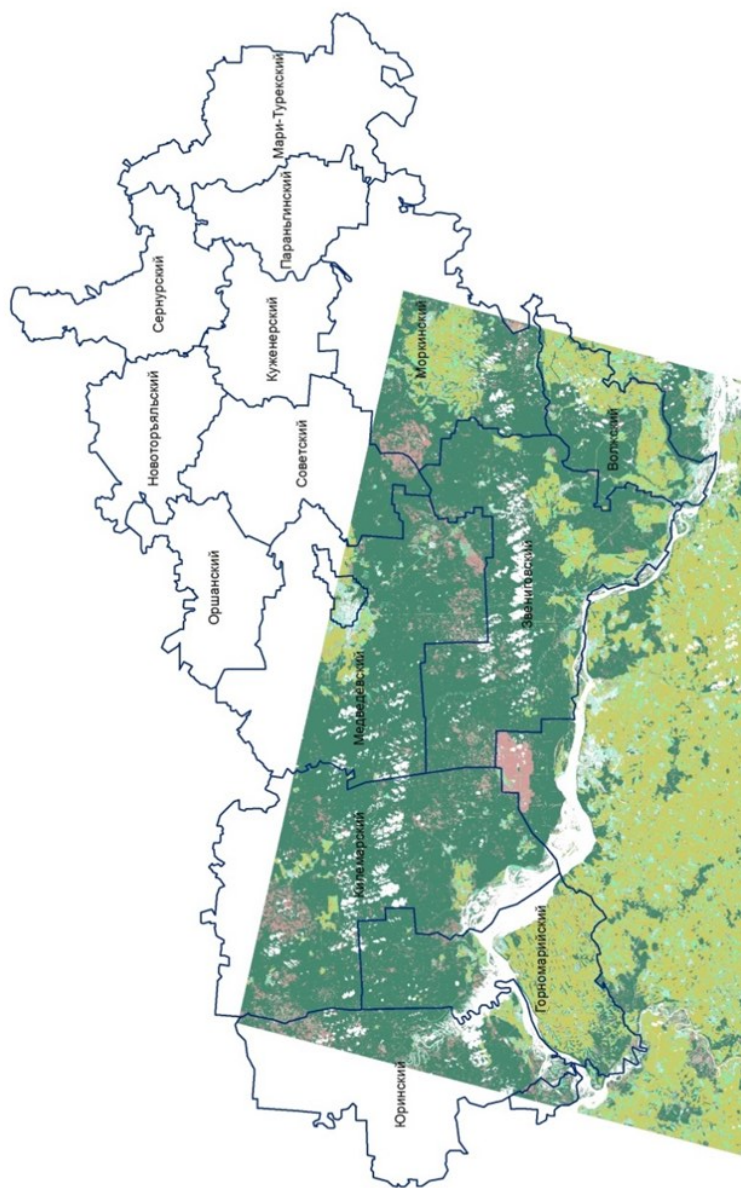


Рисунок 4.6— Тематическая карта с границами районов РМЗ

4.3. Анализ нарушенности лесного покрова за 1985-2014 гг.

Результаты тематического картографирования нарушенности наземного (лесного) покрова Среднего Поволжья показаны на рисунке 4.7. Представленные в работе данные отражают все площади нарушений лесного покрова по временным периодам, начиная с данных спутниковых изображений Landsat 1985 г., а также с учетом участков лесных гарей 2010 г. (таблица 4.3). Лесные пожары 2010 г. внесли существенный вклад в увеличение нарушенных площадей.

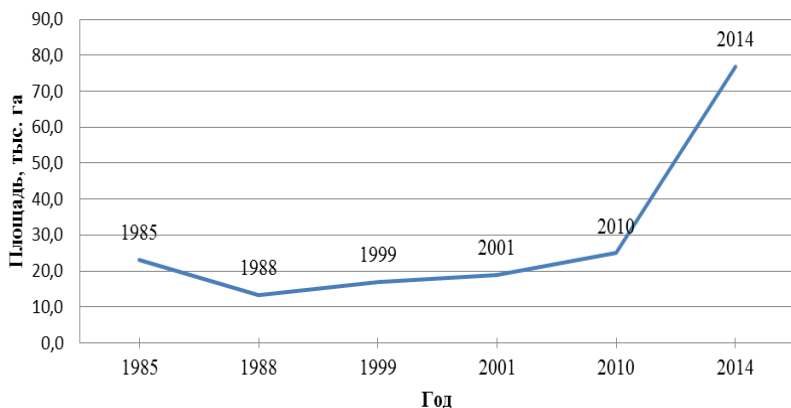


Рисунок 4.7 – График распределения площадей нарушенности лесного покрова

Общее распределение нарушений лесного покрова представлено тематическими классами в пределах изучаемой сцены (рисунок 4.8). Выявленные нарушения лесного покрова являются результатом антропогенного и природного воздействия (Griffiths et al., 2014; Hostert et al., 2011; Plungmacher et al., 2014; Иванов и др., 2009; Курбанов и др., 2011; Полевщикова, 2013). На тематической карте их распределение неравномерно по всей территории исследования.

Таблица 4.3 – Динамика распределения площадей нарушенности в разные годы

Нарушенности по периодам	Площадь, га	Процент от площади лесной маски за 1985-2014
До 1985 г.	25608,3	1,5
1985-1988 гг.	14749,6	0,8
1988-1999 гг.	18836,4	1,1
1999-2001 гг.	21024,5	1,2
2001-2010 гг.	27617,4	1,6
2010-2014 гг.	85120,7	4,8
Ненарушенные участки	1568641,2	89,0

По результатам проведенных исследований было установлено, что площадь гарей на лесных землях республик Марий Эл и Чувашии в пределах исследуемой сцены достигает 79083,36 га (рисунок 4.9). Лесные пожары 2010 года серьезно затронули лесные земли Килемарского, Юринского, Кокшайского, Куярского, Моркинского и Волжского лесничеств РМЭ, а также Ибресинского, Чебоксарского, Алатырского и Кирского лесничеств ЧР (Воробьев и др., 2014).

В основном нарушенные лесные объекты представлены отдельными участками (вырубки, усыхающие древостои) или большими площадями (лесные гари 2010 г.). Значительные площади нарушений в 80-е годы чаще являются результатом проведения интенсивных сплошнолесосечных работ (Сухих и др., 2006). На поврежденных площадях в дальнейшем проводи-

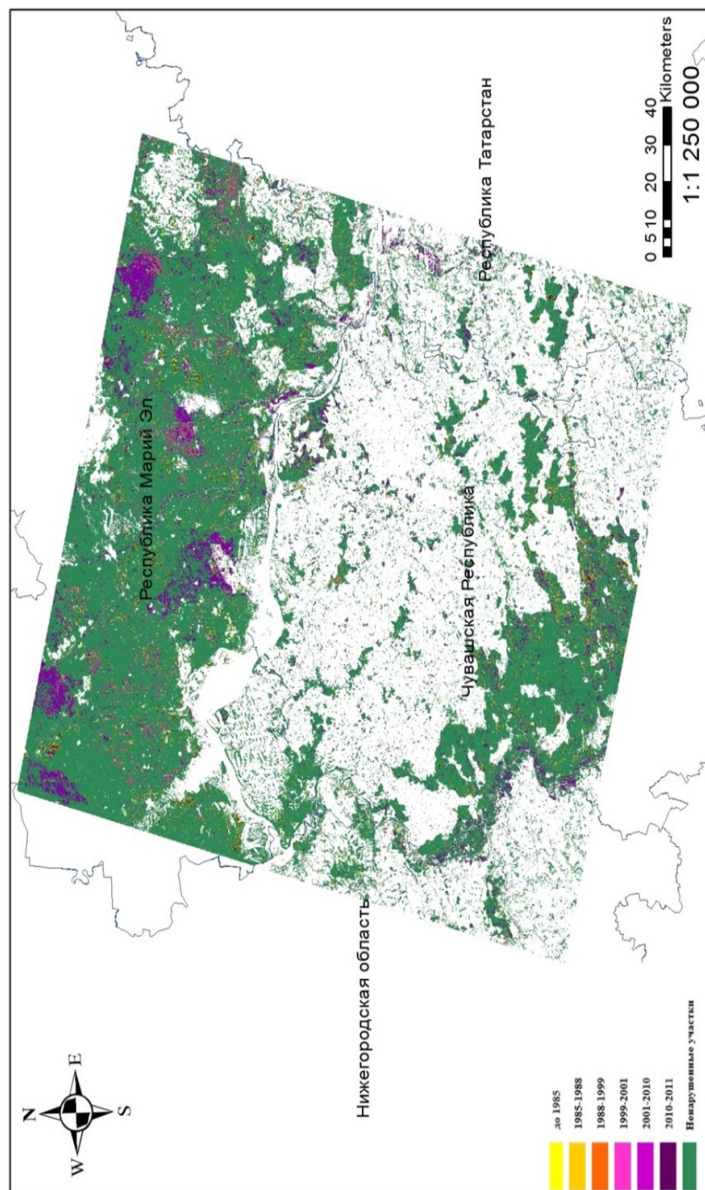


Рисунок 4.8 – Тематическая карта нарушения лесного покрова за 1985-2014 гг.

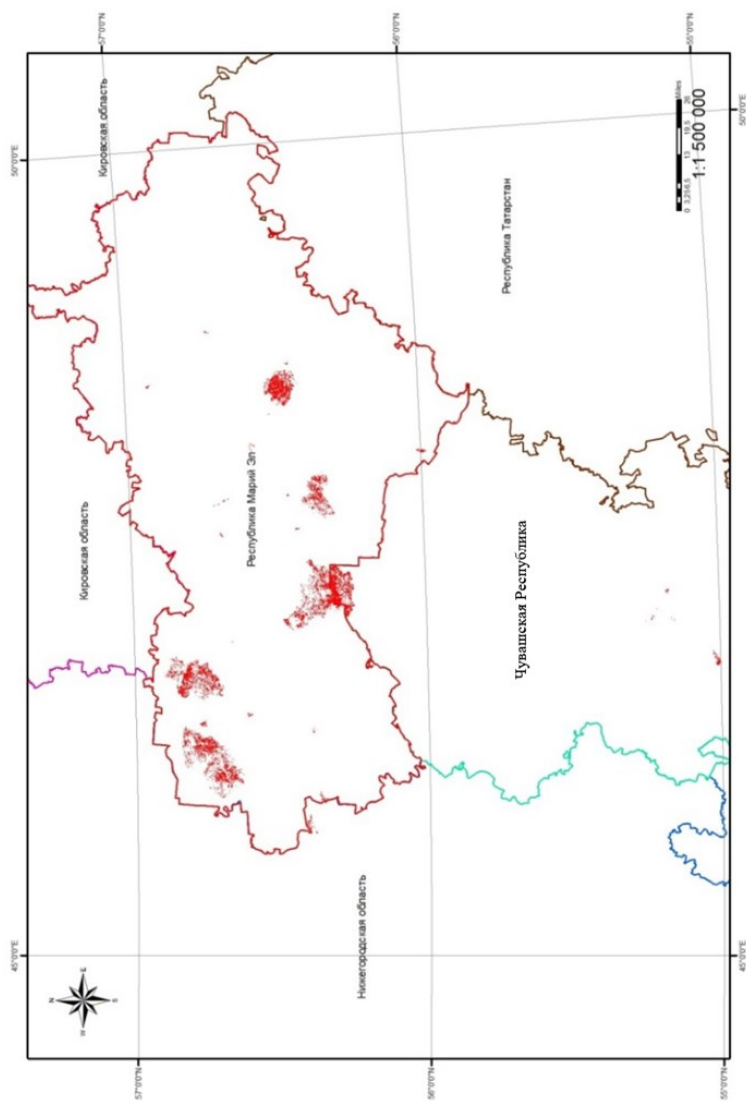


Рисунок 4.9 – Территория исследования с участками лесных гарей 2010 года

лись интенсивные лесовосстановительные работы (Денисов и др., 2015; Романов и др., 2013).

На значительной территории южнотаежной подзоны Среднего Поволжья произошла смена хвойных насаждений вторичными лиственными насаждениями. К 2000 году в исследуемом регионе наряду с доминирующими сплошными вырубками стала увеличиваться доля выборочных рубок лесов (Алексеев и др., 2008; Демаков и др., 2014). Результаты исследования показывают значительные различия в нарушениях лесного покрова до 1999 и после 2001 года.

Изменения за периоды 1985-1988 и 2010-2014 гг. обуславливаются интенсивными сплошными рубками лесных насаждений и пожарами 2010 года. Кроме того, в период 1979-1980 гг. произошло массовое усыхание дубрав после морозов в русле реки Волги в районе Чебоксарского водохранилища. В связи с этим на некоторых территориях Чувашской Республики существенно снизились площади древостоев с преобладанием твердолиственных (дубовых) насаждений от подтопления и разрушения островных лесов.

В период аномально жарких погодных условий и отсутствия осадков на территории исследований Среднего Поволжья также были нарушены большие площади лесных насаждений (более 8 тыс. га), что привело к последующему усыханию и гибели еловых и дубовых древостоев.

В целом тематическая карта нарушенности лесного покрова (приложение 7) Среднего Поволжья показывает неоднородное распределение нарушений на исследуемой территории. Заметным является относительно низкий уровень представленности лесных нарушений в Республике Татарстан (6,1 %) и Нижегородской области (4,6 %). В Чувашской Республике (29,5 %) нарушения охватывают большую часть южной половины исследуемой территории с разнородным характером представ-

ленности нарушенных участков, в то время как в Республике Марий Эл наблюдается наибольшая динамика изменений в лесном покрове за исследуемый период (59,8 %).

За 2010-2014 гг. произошло 4,8 % нарушений от территории всего лесного покрова на изучаемой сцене изображения Landsat, общая площадь которого достигает 85120,65 га. Значительная часть таких нарушений затронула территорию РМЭ, в первую очередь в связи с летней аномально жаркой погодой 2010 года. В 2001-2010 гг. нарушенные участки на исследуемой территории составляли до 27617,4 га, что можно объяснить интенсивными вырубками леса и усыханиями значительных площадей еловых насаждений (Демаков и др., 2014; Чупров, 2008). Распределение по площадям нарушенных участков на исследуемой территории достаточно равномерно наблюдалось в следующие периоды: 1985-1988 (0,8 %), 1988-1999 (1,1 %) и 1999-2001 (1,2 %).

В процентном соотношении распределение нарушенных площадей варьирует от 6 до 45 % на всей исследуемой территории (рисунок 4.10) Среднего Поволжья. Наибольшее количество изменений приходится на северную часть сцены спутникового снимка, где расположена Республика Марий Эл. Нижняя часть сцены спутникового снимка Landsat охватывает небольшие лесные территории, которые в основном граничат с открытыми ландшафтами (сельскохозяйственные угодья, открытые местности).

Общая точность проведенной классификации составила 88% при коэффициенте Каппа 0,86. Следует отметить, что значение коэффициента Каппа может варьироваться от -1 до +1. Согласно существующим критериям (Курбанов и др., 2015), в нашем случае полученные коэффициенты Каппа свидетельствуют о высокой надежности согласованности данных полученной классификации с наземными исследованиями.

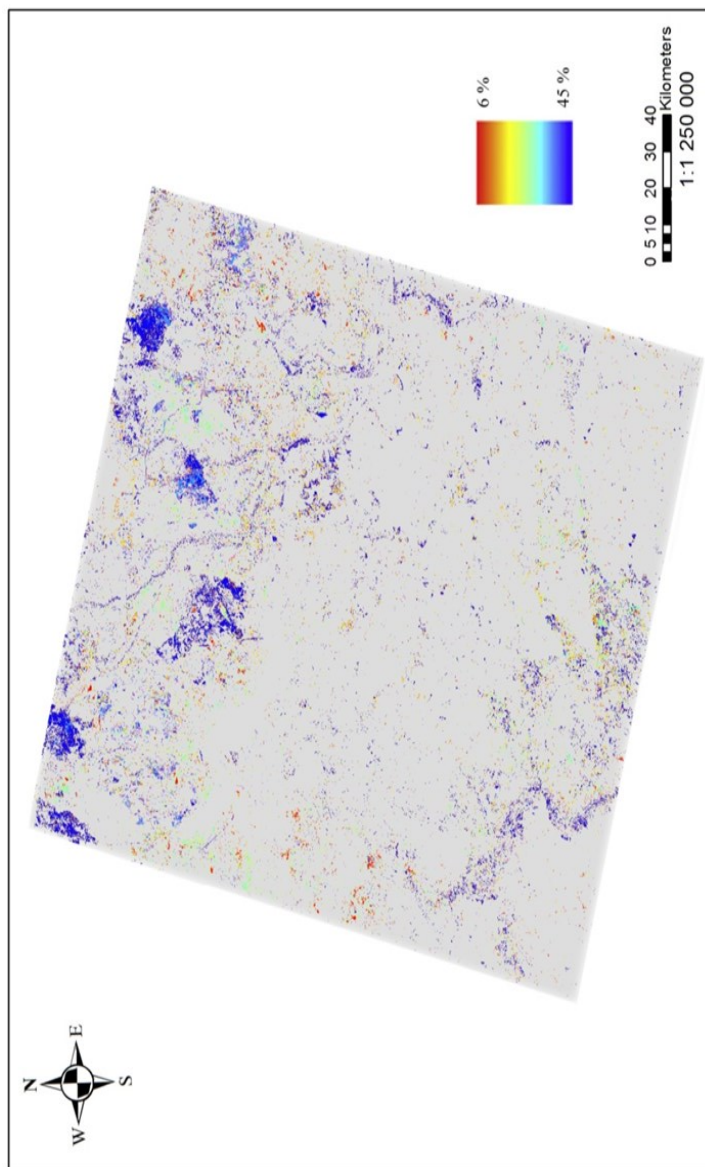


Рисунок 4.10 – Распределение площадей классов нарушения лесного покрова в процентном соотношении

4.4. Пространственно-временной анализ лесного покрова

4.4.1. Интегрированная карта нарушений в Среднем Поволжье

Моделирование лесопользования важно с точки зрения прогнозирования состояния и биологической продуктивности лесных ресурсов. Для этих целей широко используются геопространственные технологии и спутниковые изображения среднего и высокого разрешения (de Sousa et al., 2018). Пространственная корреляция исследуемых мультиспектральных данных представлена в работе в виде интегрированных карт современного состояния лесов и их динамики.

Результирующие растровые карты, полученные на основе метода расчета весовых показателей для каждого класса условного фактора и плотности событий внутри оцениваемой территории (рисунок 4.11), показывают кумулятивное накопление всех возможных биотических и абиотических нарушений в изучаемом регионе Среднего Поволжья.

Полученная карта на территорию Республики Марий Эл (рисунок 4.12) представляет собой распределение тематических классов нарушений лесного покрова (приложение 8), включая фрагменты облачности. Значения границ интерполированных классов определяют большую или меньшую зависимость рассматриваемых объектов набора данных. Анализ полученных результатов свидетельствует о существенном влиянии нарушений и пожаров на изменения в лесном покрове Республики.

Наиболее выраженные участки нарушений на результирующей карте представлены на территории Медведевского района Республики Марий Эл, где в 2010 г. были охвачены пожарами огромные территории лесных насаждений. В полученной модели отражен пространственно-временной анализ взаимосвязи изменения площадей лесного покрова тематических классов

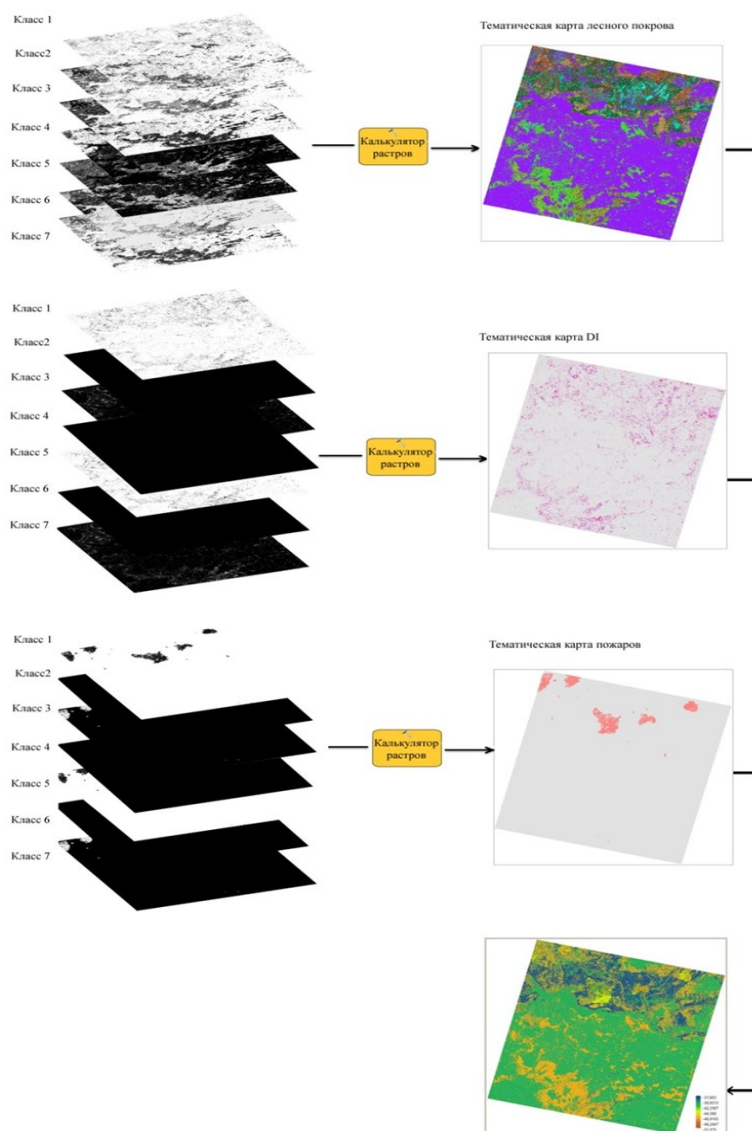


Рисунок 4.11 – Алгоритм получения интегрированной растровой карты динамики нарушенности лесного покрова

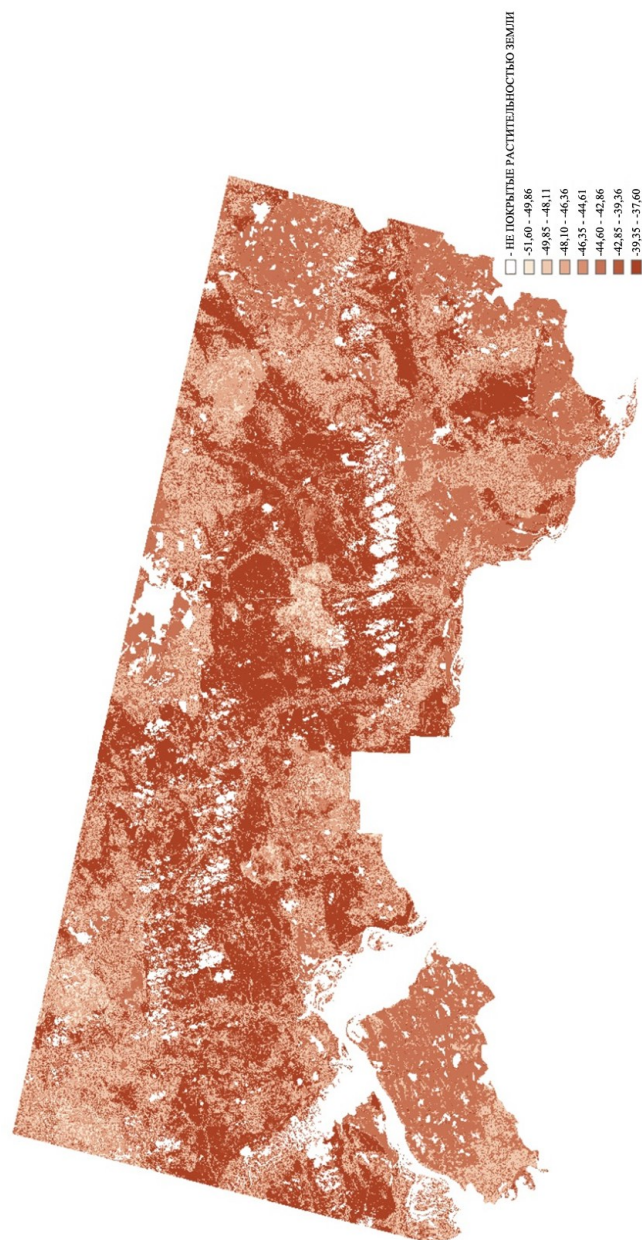


Рисунок 4.12 – Интегрированная карта нарушений в лесном покрове за 1985-2014 гг.

светлохвойных, мелколиственных и смешанных лесных насаждений. Неоднородность кластеризации лесных участков на исследуемой территории Среднего Поволжья связана с неоднородностью распределения лесных насаждений разной возрастной категории.

4.4.2. Многофакторный регрессионный анализ

В результате проведенного многофакторного регрессионного анализа для двух выбранных участков (глобального и локального уровня) интегрированной карты нарушенности региона Среднего Поволжья были получены статистические данные и коэффициенты пространственно-распределенных линейных моделей.

Результаты проведенного регрессионного анализа по методу наименьших квадратов (МНК) и представлены в виде статистических показателей, коэффициентов модели зависимости динамики леса от изучаемых факторов и геопространственных критериев в таблице 4.4. Все коэффициенты изучаемых переменных являются статистически значимыми.

На основе полученных данных можно говорить, что мультиколлинеарность (наличие сильной корреляции между переменными) в разработанной модели отсутствует. Об этом свидетельствуют низкие значения стандартной ошибки среднего (SD) параметров модели, высокие значения Т-статистики (значимость коэффициентов), которая имеет значения для параметра «Яркость» 154 (первый участок) и 32 (второй участок). Кроме того, о слабой мультиколлинеарности параметров полученных моделей говорят статистики VIF, которые для всех факторов сохраняют стабильное значение, равное 1. Значения вероятности и устойчивой вероятности близки к минимальным значениям, что также отвергает нулевую гипотезу.

Об отсутствии стационарности (однородности) факторов в исследуемом пространстве признаков свидетельствует стати-

Таблица 4.4 – Результаты проведения многофакторного регрессионного анализа с помощью МНК: представлены статистические показатели и коэффициенты модели зависимости динамики леса от изучаемых факторов

Показатель	Коэффициенты	SD	T-статистика	Вероятность	Устойчивая вероятность	VIF
Участок № 1						
Intercept ³	25,97	0,096	269,1	0.000	0,107	-
Лес (F)	0,03	0,008	3,4	0,000	0,007	1,00
Нарушенность (Bt)	-0,49	0,01	-45,7	0.000	0,01	1,00
Яркость (Br)	0,08	0,000 ₅	154,716	0.000	0,000	1,00
Участок № 2						
Intercept	30,439	0,562	54,0	0.000	0,626	-
Лес (F)	-0,245	0,032	-7,6	0.000	0,035	1,00
Нарушенность (Bt)	-0,576	0,077	-7,4	0.000	0,073	1,00
Яркость (Br)	0,073	0,002	32,2	0.000	0,003	1,00
DEM	-0,011	0,004	-2,7	0,007	0,004	1,00

³Координата пересечения с осью Y (свободный член в уравнении)

стика Кенкера, имеющая низкую вероятность (таблица 4.5). Тем не менее, несмотря на наличие нестационарности, полученные модели можно считать статистически значимыми в связи с высоким значением критерия Фишера и статистики Вальда.

Таблица 4.5 – Статистики для оценки результатов анализа МНК

Показатель качества модели	Значение	Характеристика модели	Значение
Участок 1			
Количество наблюдений	151228		
Множественный R^2	0,27	Уточнённый R^2	0,22
F-статистика	8610	Вероятность ($>F$), (3) степеней свободы	0,000
Статистика Вальда	18195	Вероятность ($>\chi^2$), (3) степеней свободы	0,000
Статистика Кенкера	14118	Вероятность ($>\chi^2$), (3) степеней свободы	0,000
Статистика Жака-Бера	38417	Вероятность ($>\chi^2$), (2) степеней свободы	0,000
Информационный критерий Акаике (AIC)	1120240		
Общий индекс Морана I	0,25	Вероятность (p-value)	0,000
Участок 2			
Количество наблюдений	6920		
Множественный R^2	0,36	Уточнённый R^2	0,32
F-статистика	293	Вероятность ($>F$), (3) степеней свободы	0,000
Статистика Вальда	580	Вероятность ($>\chi^2$), (3) степеней свободы	0,000
Статистика Кенкера	839	Вероятность ($>\chi^2$), (3) степеней свободы	0,000
Статистика Жака-Бера	5569	Вероятность ($>\chi^2$), (2) степеней свободы	0,000
Информационный критерий Акаике (AIC)	46117		
Общий индекс Морана I	0,34	Вероятность (p-value)	0,000

При наличии нестационарности взаимодействия изучаемых факторов используются данные статистики Жака-Бера. Первый участок демонстрирует близкое к нормальному распределение невязок (сумма квадратов отклонений), но с заметным эксцессом. Для второго участка характерно значительное смещение распределения невязок от кривой нормального распределения. Эти данные также отвергают нулевую гипотезу в пользу нестационарности полученной модели. Результаты пространственной автокорреляции разработанных моделей показали низкие значения индекса Морана, который при отсутствии автокорреляции стремится к единице.

Общие выводы по проведению анализа геопространственных данных методом наименьших квадратов указывают на отсутствие стационарности параметров многофакторной регрессионной модели. Поэтому в работе приведены результаты еще одного метода – географически взвешенной регрессии (ГВР). Использование данного метода позволило устранить проблему с нестационарностью параметров модели и повысить производительность ранее полученных моделей.

Для максимальных значений коэффициентов регрессионной модели ГВР заметно повышается коэффициент детерминации (локальный R^2), который для 1 участка составил 0,43, для второго – 0,58 (таблица 4.6). Данные показатели свидетельствуют о наилучшем взаимодействии изучаемых факторов при оценке динамики лесного покрова.

Результаты статистического анализа представлены в виде визуальных диаграмм рассеивания значений независимых факторов (рисунок 4.13), которые говорят о сложности проводимой оценки пространственных закономерностей и различии в степени влияния независимых факторов на структуру и состояние лесных экосистем Среднего Поволжья. Гистограммы на рисунке 4.13 показывают распределение коэффициентов каждой пе-

Таблица 4.6 – Данные моделирования географически взвешенной регрессии

Показатели		Значения			
		Среднее	Мин.	Макс.	SD
1 участок					
Коэффициенты регрессии	Intercept	28,4	-12,639	63,339	9,197
	Лес	1,63	-1,525	3,8	0,696
	Нарушенность	-0,221	-3,76	3,172	0,928
	Яркость	0,219	-0,023	0,261	0,54
Локальный R ²		0,43	0,21	0,56	0,115
2 участок					
Коэффициенты регрессии	Intercept	31,781	15,129	47,148	6,402
	Лес	-0,225	-1,189	1,599	0,691
	Нарушенность	-0,461	-4,607	1,265	0,794
	Яркость	0,32	-0,01	0,65	0,139
	DEM	0,038	-0,051	0,128	0,022
Локальный R ²		0,58	0,451	0,66	0,25

ременной исследуемой модели. Каждый график представляет отношение независимых переменных друг к другу. Такое пространственное распределение факторов является важным материалом для последующего анализа и использования при принятии решений в области лесохозяйственной деятельности.

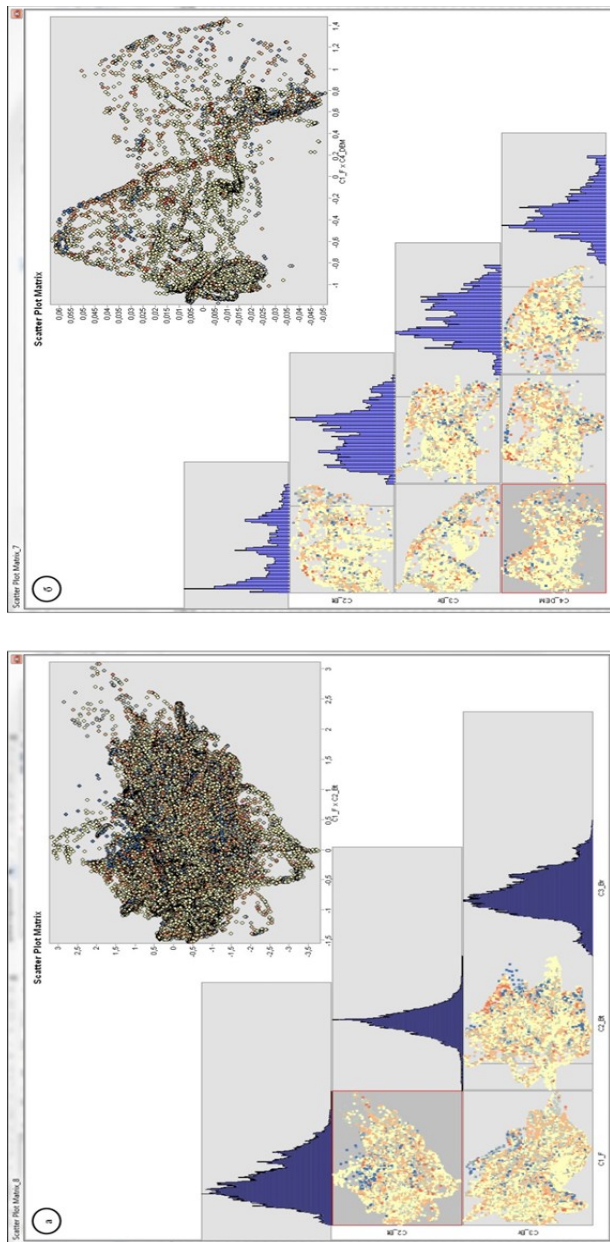


Рисунок 4.13 – Диаграмма рассеивания значений пространственных данных: а) участок №1, б) участок №2

Распределения стандартных отклонений представлены в виде тематических карт на рисунке 4.14. Пространственное распределение стандартных отклонений является содержательным материалом (данных) для последующего анализа и использования при принятии решений в области лесохозяйственной деятельности. Группировка максимальных отклонений пространственных данных (коричневый цвет на рисунке 4.13) на территории исследования Среднего Поволжья может свидетельствовать о возможных рисках нарушений (потенциальные лесные пожары, усыхание, буреломы, ветровалы и пр.) для выделенных участков, на которые стоит обратить особое внимание.

При проведении многофакторного регрессионного анализа для первого участка (глобальный вариант) нами не использовался дополнительный параметр – ЦМР (DEM). Это было связано с тем, что на большой равнинной территории Среднего Поволжья показатели превышений рельефа на местности не могут оказать значительного влияния на пространственную модель. В то же время на небольших фрагментах (участок 2) изучаемой сцены изображения Landsat изменения показателей высот выражены более существенно, что может быть использовано для повышения производительности соответствующей модели. Поэтому фактор ЦМР был использован для разработки пространственной модели только на втором участке.

Полученные в работе многофакторные регрессионные модели на основе пространственной взаимосвязи динамики лесного покрова («Дин_Лес») с независимыми факторами для двух фрагментов сцены изображения Landsat выглядят следующим образом:

$$\text{Дин_Лес} = 28,4 + 1,63 * F - 0,221 * Bt + 0,22 * Br \text{ (для 1 участка)}$$

$$\text{Дин_Лес} = 31,8 - 0,22 * F - 0,46 * Bt + 0,32 * Br + 0,04 * DEM \text{ (для 2 участка)}$$

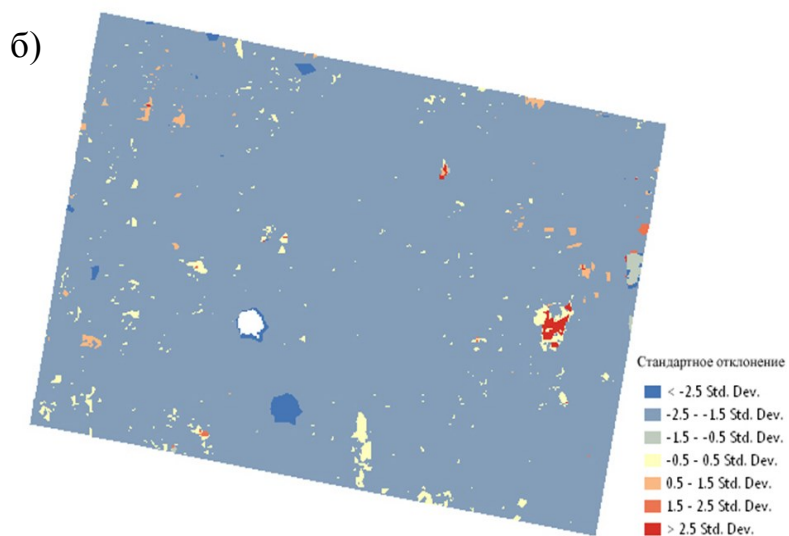
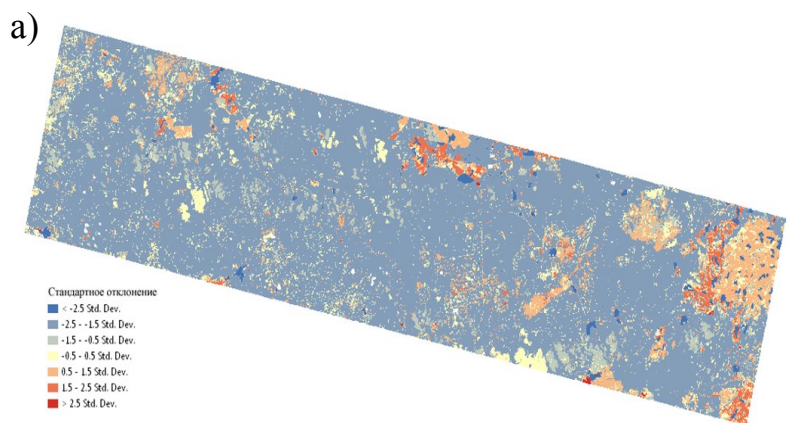


Рисунок 4.14 – Карты пространственного распределения стандартных отклонений: а) участок №1, б) участок №2

На изучаемом участке 2 (региональный) результаты полученной модели ГВР указывают на отрицательный коэффициент регрессии фактора «Лес» (F), что говорит об обратной связи с динамикой лесного покрова (Дин_Лес). Это подтверждает факт, что снижение площади лесов приводит к увеличению нарушенных участков.

Положительные коэффициенты регрессии для фактора «Яркость» (Bg) в оцениваемых моделях на участках говорят о прямой взаимосвязи с динамикой лесного покрова. Данная зависимость объясняется тем, что увеличение значений фактора «Яркость» способствует уменьшению фитомассы, а с уменьшением показателей яркости происходит обратный процесс, то есть накопление фитомассы лесной растительности.

Анализ влияния параметра «Нарушенность» (Bt) показал, что моделирование с данным фактором отражает происходящие сукцессионные процессы лесного покрова в пространстве и во времени: лесовозобновление и противоположные ему процессы, характеризующие снижение площади лесного покрова в результате воздействия антропогенных и природных факторов (вырубки, усыхания древостоев, пожары).

Отрицательные значения коэффициентов показателя Bt свидетельствуют об обратном влиянии на динамику лесного покрова для всех изучаемых участков.

Участие в модели данного фактора повышает вероятность увеличения изменений лесного покрова в положительную сторону с уменьшением фактора различных нарушений. К примеру, переход от класса открытых участков (на вырубках и гарях) к классу молодняков естественного или искусственного происхождения. Об этом также свидетельствует тот факт, что тенденция к снижению площади лесов на исследуемой территории составила 7,45 % за 29-летний период от всей лесной территории исследования.

Похожие процессы можно наблюдать на бывших сельскохозяйственных землях угодий, на которых в последние годы происходит активное возобновление древесно-кустарниковой растительности.

В полученной регрессионной модели для участка 2 наблюдается слабая прямая зависимость между показателями динамики лесного покрова и ЦМР, что обусловлено относительной равномерностью рельефа (перепад высот) оцениваемого ландшафта.

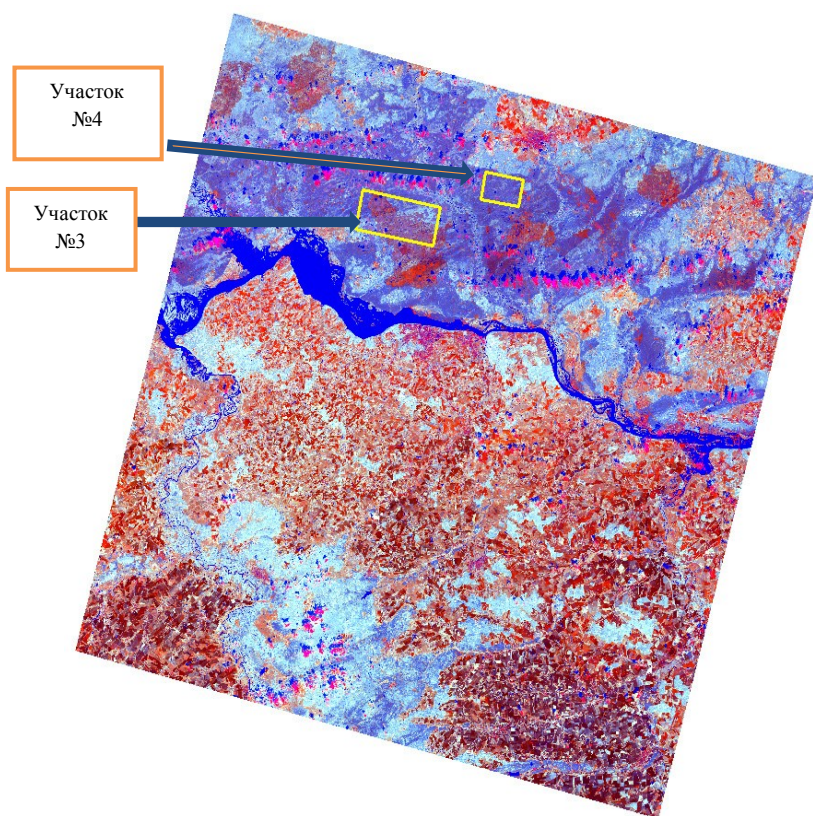


Рисунок 4.15 – Расположение фрагментов 3 и 4 для проведения многофакторного регрессионного анализа на спутниковом изображении Landsat

Дополнительно были рассмотрены еще два небольших фрагмента на разных участках сцены (рисунок 4.15).

Результаты проведения анализа геопространственных данных по МНК (таблица 4.7) показали отсутствие мультиколлинеарности полученных моделей, что также подтверждают низкие значения ошибки среднего.

В то же время как в первом, так и во втором случае показатель VIF показывает стабильные значения, а значения вероятности минимальны.

Таблица 4.7 – Результаты многофакторного регрессионного анализа с помощью МНК: статистические показатели и коэффициенты модели

Показатель	Коэффициенты	SD	Т-статистика	Вероятность	Устойчивая вероятность	VIF
Участок 3						
Intercept	22,54	0,594	37,9	0,000	0,7602	
Лес (F)	0,07	0,035	2,1	0,034	0,0392	1,00
Нарушенность (Bt)	-0,17	0,030	-5,8	0,000	0,0319	1,00
Яркость (Bг)	0,11	0,003	34,7	0,000	0,0048	1,00
DEM	0,02	0,004	-4,1	0,000	0,0039	1,00
Участок 4						
Intercept	38,15	1,219	31,3	0,000	2,5018	-
Лес (F)	0,42	0,103	4,1	0,0001	0,1497	1,07
Нарушенность (Bt)	-0,33	0,217	-1,5	0,1345	0,3281	1,11
Яркость (Bг)	0,0003	0,008	0,03	0,973	0,0208	1,19
DEM	-0,0009	0,008	-0,09	0,9227	0,008	1,01

Об отсутствии стационарности исследуемых факторов в пространстве признаков полученных данных также свидетельствует ряд статистик, приведенных в таблице 4.8. К ним относятся низкая вероятность статистики Кенкера, Вальда, а также низкие показатели пространственной автокорреляции (индекс Морана I).

Проведенная географически взвешенная регрессия для изучаемых моделей (участки 3 и 4) показала невысокие значения коэффициентов детерминации (локальный R^2). Для 3-го участка результат составил 0,36; для 4-го – 0,31. Пространственное распределение стандартных отклонений представлено в виде карт на рисунке 4.16. Для участка 3 неоднородность кластеризации связана с влиянием нарушенных территорий. На данном фрагменте растительный покров представлен разными стадиями сукцессии: участки после пожаров, вырубки, лесовозобновления молодой растительности. Для участка 4, как видно на рисунке 4.16, характерны более однородные с относительно стабильной плотностью распределения стандартные отклонения.

В целом разработанные модели, описывающие пространственную взаимосвязь условно принятых независимых факторов на нарушенность лесного покрова, могут быть использованы в качестве достоверных моделей, представляющих эти процессы в пространстве и во времени.

Результаты регрессионного анализа и карты стандартных отклонений (см. рисунок 4.16) свидетельствуют о том, что высокая степень пространственной автокорреляции исследуемых данных выражается в концентрации положительных значений в определенных местах вновь полученных карт, что говорит о высокой вероятности выявления изменений (нарушений) в лесном покрове на этих участках. Обычно такие участки располагаются на площадях, тяготеющих к лес-

Таблица 4.8 - Статистики для оценки результатов анализа МНК
(для участков 3,4)

Показатель качества модели	Значение	Характеристика модели	Значение
Участок 3			
Количество наблюдений	7347		
Множественный R^2	0,15	Уточнённый R^2	0,15
F-статистика	327	Вероятность ($>F$), (3) степеней свободы	0,000
Статистика Вальда	738	Вероятность ($>\chi^2$), (3) степеней свободы	0,000
Статистика Кенкера	543	Вероятность ($>\chi^2$), (3) степеней свободы	0,000
Статистика Жака-Бера	3106	Вероятность ($>\chi^2$), (2) степеней свободы	0,000
Информационный критерий Акаике (AIC)	51995		
Общий индекс Морана I	0,26	Вероятность (p-value)	0,000
Участок 4			
Количество наблюдений	804		
Множественный R^2	0,024	Уточнённый R^2	0,019
F-статистика	4,98	Вероятность ($>F$), (3) степеней свободы	0,000
Статистика Вальда	10,9	Вероятность ($>\chi^2$), (3) степеней свободы	0,027
Статистика Кенкера	39,6	Вероятность ($>\chi^2$), (3) степеней свободы	0,000
Статистика Жака-Бера	5144	Вероятность ($>\chi^2$), (2) степеней свободы	0,000
Информационный критерий Акаике (AIC)	51997		
Общий индекс Морана I	0,24	Вероятность (p-value)	

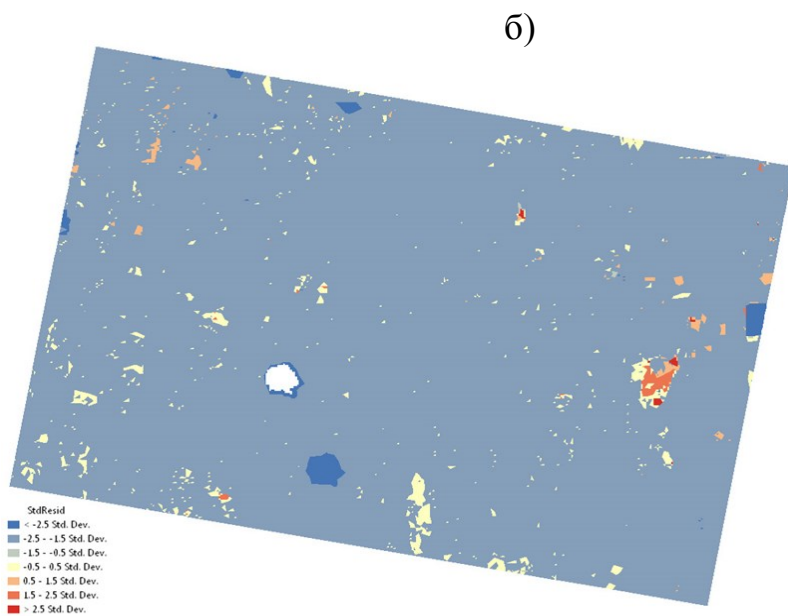
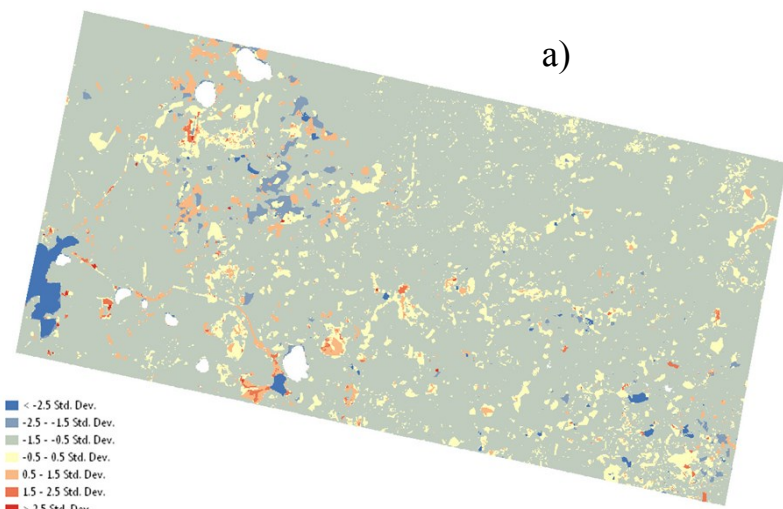


Рисунок 4.16 – Карты пространственного распределения стандартных отклонений: а) участок №3; б) участок №4

ным опушкам, населенным пунктам, транспортным путям. Кроме того, больше всего такое пространственное распределение характерно для нарушенных участков (лесные гари, вырубки, ветровалы, буреломы и т.п.).

Следует отметить, что пространственное распределение факторов, влияющих на динамику лесного покрова региона Среднего Поволжья, указывает на то, что процесс обезлесения выражается на полученных картах намного заметнее, чем обычные процессы лесовосстановления. На разновременных спутниковых изображениях это обстоятельство выражается в резком изменении спектрально-отражательных свойств лесных ландшафтов, что наблюдается в результате нарушений (лесные пожары, ветровалы, болезни растений, сплошные вырубки). При моделировании методом ГВР это приводит к дальнейшей кластеризации положительных отклонений оцениваемого фактора на изучаемом участке.

На основе проведенного регрессионного анализа можно сказать, что для получения модели множественной пространственной регрессии динамики лесного покрова Среднего Поволжья необходимо руководствоваться общепринятыми принципами оценки пространственных закономерностей, подробно рассмотренными нами выше. Выбор изучаемой территории по площади должен быть сопоставим с пространственным разрешением используемых спутниковых изображений и горизонтальной структурой местности, включая данные ЦМР. Для спутникового снимка Landsat такая площадь может быть сопоставима с площадью одного лесничества и большей территорией (административного района).

Для оценки степени влияния независимых факторов на динамику лесного покрова следует использовать показатели интегрированного весового коэффициента, который хорошо показывает уровень воздействия факторов на зависимый показатель

(площадь лесного покрова). Получаемые по разработанному в исследовании пошаговому алгоритму пространственные модели ГВР могут расширить и углубить наше понимание взаимосвязи факторов (биотических и абиотических) окружающей среды и сложных природных процессов при оценке динамики лесных насаждений.

4.4.3. Прогнозная карта динамики лесного покрова

Полученный алгоритм пространственно-временного анализа на примере региона Среднего Поволжья позволяет разрабатывать прогнозные карты распределения лесного покрова на исследуемой территории. Полученные данные свидетельствуют о значительном пространственном и временном различии динамики лесного покрова на всей сцене изображения спутника Landsat.

В качестве примера рассмотрен прогноз динамики лесного покрова до 2044 года (+30 лет). Среди главных факторов, используемых в этом прогнозе, были следующие растровые данные:

- условная динамика лесного покрова;
- условная динамика вырубок в спелых насаждениях, сопоставимых с данными предыдущих 30 лет.

При моделировании также были использованы изменения в лесном покрове, полученные ранее Центром устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов ФГБОУ ВО «ПГТУ» в виде тематических данных.

Карта прогнозной динамики лесного покрова была получена на основе подробно описанного ранее метода растрового наложения бинарных карт и интерполяции значений весовых показателей на всю изучаемую площадь по соответствующим пространственным параметрам (рисунок 4.17). Анализ разработан-

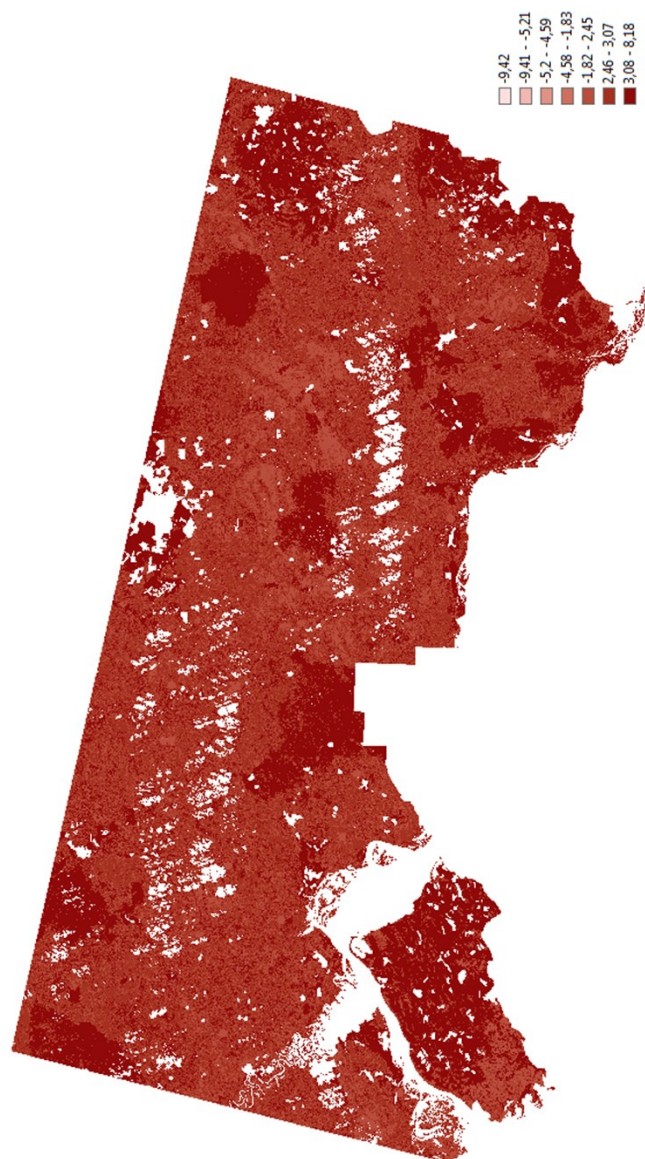


Рисунок 4.17 – Прогнозная карта динамики лесного покрова 2014-2044 гг. на примере Республики Марий Эл с градацией значений границ весового показателя

ной прогнозной карты позволил выявить следующие тенденции в динамике лесного покрова исследуемой местности:

1. Участки с максимальными изменениями в лесном покрове Среднего Поволжья по данным вновь разработанной прогнозной карты будут сконцентрированы на территории гарей 2010 г. и других нарушенностей. Именно на этих участках, согласно естественным сукцессионным процессам, должно происходить активное накопление фитомассы за исследуемый период времени (лесовозобновление молодой древесно-кустарниковой растительностью). Между тем неоднородность кластеризации лесных участков на исследуемой территории может быть связана с неоднородностью растительного покрова, находящегося на разных стадиях сукцессии.

2. Большая часть остальной исследуемой территории представляет собой относительно стабильные участки с однородной плотностью распределения в пространстве и динамикой накопления фитомассы.

3. Представленная прогнозная (ситуационная) карта динамики лесного покрова Среднего Поволжья отражает далеко не полную картину возможных антропогенных и природных рисков для оцениваемых лесных насаждений. В частности, каждые 30-50 лет высока вероятность крупных лесных пожаров, ветровалов, буреломов, заболеваний лесных насаждений, изменений принципов хозяйствования в связи с реформированием лесной отрасли и т.п.).

4. Увеличение числа дополнительных антропогенных и природных (биотических и абиотических) факторов при разработке подобных ситуационных карт и моделей поможет в дальнейшем существенно повысить точность прогноза динамики лесного покрова.

5. Прогнозные карты динамики лесного покрова могут иметь большое практическое значение при принятии важных

решений в области хозяйственной деятельности, экологии и лесном хозяйстве.

Полученные в нашем исследовании результаты моделирования и анализа большого объема спутниковых данных подтверждают, что нарушение в виде регулярно происходящих крупных пожаров в засушливый период является основным фактором, играющим ключевую роль в динамике лесных ландшафтов объектов исследования в Среднем Поволжье. Все остальные негативные факторы (ветровалы, усыхание древостоев, вырубки), влияющие на динамику развития лесного покрова, имеют в таких пространственно-временных оценках менее значимое влияние.

Прогнозная модель и тематическая карта показывают, что основные изменения (активное накопление фитомассы и соответствующее депонирование углерода) на предстоящий 30-летний период для исследуемой территории Среднего Поволжья будут иметь место на горях 2010 г.

В работе прогнозная пространственно-временная модель динамики лесного покрова также строилась с учетом этих предположений. Тем не менее, по усмотрению специалиста-аналитика, она позволяет усиливать или уменьшать степень влияния того или иного фактора на динамику исследуемого участка лесного покрова.

Выводы по главе 4

По результатам исследования пространственной динамики лесного покрова можно сделать следующие выводы:

1. Получены тематические карты на 7 классов лесного покрова на исследуемую территорию Среднего Поволжья на основе спутниковых снимков Landsat 1985, 2001 и 2014 гг. Общая точность классификаций составила 84 % при коэффициенте Каппа 0,82, что свидетельствует о хорошей согласованности исследуемых тематических карт.

2. Классификация лесного покрова показала близкие по своим значениям спектральные яркости в классах мелколиственных и смешанных насаждений. С другой стороны, светлохвойные насаждения продемонстрировали высокую спектральную делимость, что позволило повысить точность сформированных тематических карт.

3. Разработанные тематические карты Landsat 1985, 2001 и 2014 гг. для 7 классов лесного покрова на исследуемую территорию Среднего Поволжья показывают снижение площади класса светлохвойных на 4 %. Одновременно с этим наблюдается уменьшение классов мелколиственных (19 %) и смешанных (8%) насаждений, а также увеличение молодняков (23 %). Изменение площадей классов связано с влиянием природных и антропогенных факторов (пожары 2010 года, усыхание еловых древостоев, рубки леса).

4. Сформированная тематическая карта динамики лесного покрова отражает пространственное распределение классов уменьшения (7,45 %), увеличения (11,38 %) и неизменное состояние лесного покрова (32,86 %) на территории исследования. Результаты бивариантного картографирования для расчета количественных показателей пространственных данных могут быть использованы при оценке пространственных нарушений (вероятных рисков) изучаемой территории. В этом случае применение ГИС-методик и данных ДЗЗ позволяет группировать, анализировать и визуализировать полученную пространственную (географическую) информацию с последующим получением статистически значимых математических уравнений пространственных взаимосвязей изучаемых явлений.

5. Используемые в исследовании преобразования изображений Tasseled Cap и индекс нарушенности (Disturbance Index) позволили с высокой точностью (88 %) выявить динамику нарушенных участков лесного покрова на исследуемой терри-

тории. На основе экспертной оценки кривых значений DI было выделено 90 полигонов на нарушенных лесных участках и 100 – на участках, не затронутых изменениями за 1985-2014 гг.

6. Разработанная тематическая карта динамики лесного покрова за период 1985-2014 гг. показывает распределение нарушенных площадей на территории Среднего Поволжья. Установлен низкий уровень лесных нарушений по снимкам Landsat в Нижегородской области (4,6 %) и Республике Татарстан (6,1 %). Наибольшая часть нарушений приходится на северную часть сцены спутникового снимка, где расположена Республика Марий Эл (59,8 %). Значительные нарушенные лесные территории, охватывающие южную часть сцены Landsat, приходятся на Чувашскую Республику (29,5 %). Наибольшая площадь (85120,65 га) нарушенности лесного полога выявлена за период с 2010 по 2014 гг. Высокий уровень нарушений за этот период обусловлен интенсивной лесохозяйственной деятельностью (вырубками) и влиянием природных условий (пожары, засухи). В остальные периоды площадь нарушений изменяется незначительно: 1,6 % (от площади всего лесного покрова за наблюдаемый период) за период 2001-2010 гг.; 1,2 % – за 1999-2001гг.; 1,1 % – за 1988-1999 гг.; 0,8 % – за 1985-1988 гг.

7. Интегрированная карта нарушенности показывает кумулятивное накопление всех нарушений лесного покрова. Данный информационный продукт является важнейшим для понимания динамики лесного покрова, что станет основой для большого количества разнообразных исследований и оценок.

8. Проведен многофакторный регрессионный анализ нарушенности лесного покрова исследуемой территории в зависимости от ее пространственных параметров. Получены модели пространственной взаимосвязи изменения лесного покрова с учетом факторов, влияющих на нарушения лесов. Пространственное распределение нарушенностей лесного покрова за 1985-

2014 гг. сыграло важную роль при оценке изменения и определении характера уменьшения лесного покрова лесной территории. Полученные модели пространственного распределения лесного покрова могут быть использованы для дальнейшего прогнозирования изменений в лесном покрове.

9. Влияние на лесной покров пожаров и ветра, имеющих стохастический (случайный) характер, может наблюдаться в любом насаждении исследуемой территории. В тоже время, проведенная оценка пространственной неоднородности территории позволила выявить некоторую закономерность не случайности данных явлений, что обуславливается их проявлением на участках определённой возрастной структуры насаждений и развитостью дорожной инфраструктуры. Например, лесным пожарам, в первую очередь, подвержены относительно однородные по составу хвойные насаждения разного класса возраста. Ветровалы обычно происходят в лесных насаждениях старшего возраста и средней полноты, расположенных на открытых, равнинных участках. Интенсивная вырубка ведется в насаждениях, в первую очередь, целевых пород, имеющих возраст хозяйственной спелости. В изучаемом регионе к ним относятся однородные спелые и перестойные хвойные насаждения.

10. Сформирована прогнозная карта лесного покрова в перспективе на 30 лет (до 2044 г.). Данная карта позволяет отследить динамику изменений лесного покрова. Кроме того, она может служить основой для специализированных ГИС (например, прогнозная модель распространения лесных пожаров).

11. Разработанная методика пространственно-временного анализа лесного покрова на территории Среднего Поволжья позволила провести оценку пространственной динамики лесной растительности и выявить участки, нарушенные со временем в результате рубок, усыхания древостоев, лесных пожаров и других факторов влияния. Лесные пожары серьезно затронули

земли Килемарского, Юринского, Кокшайского, Куярского, Моркинского и Волжского лесничеств Республики Марий Эл, а так же Ибресинского, Чебоксарского, Алатырского и Кирского лесничеств Чувашской Республики. Площадь гарей на лесных землях в пределах исследуемой сцены достигает 79083,36 га. Проведенный анализ результатов позволяет получать модели прогноза с возможностью повторения какого-либо пространственного события (нарушения) в будущем. Моделирование таких карт может служить важной основой для принятия решений при планировании и проведении работ по защите и воспроизводству лесов.

12. Пространственно-временной анализ проводился на основе использования методов геостатистики в ПК ArcGIS, представляющих собой применение метода наименьших квадратов и географически взвешенной регрессии. Оценка полученных моделей осуществлялась на основе значений статистик многофакторного регрессионного анализа. Разработанные модели можно считать статистически значимыми на основании высоких значений критерия Фишера (8610) и статистики Вальда (18195). Р-значение Кенкера показывает, что моделируемые отношения содержат статистически значимую нестационарность модели, показатель критерия Акаике (1120240) указывает на соответствие реальным данным. Низкое значение индекса Морана (0,25) доказывает автокорреляцию изучаемых параметров модели.

13. Полученные пространственные карты взаимосвязи изучаемых факторов динамики лесного покрова представляют собой визуализацию данных с распределением пороговых значений коэффициентов, отражающих зависимости между рассматриваемыми явлениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы для мониторинга лесного покрова как на глобальном, так и на региональном уровне все большее применение находят спутниковые изображения, имеющие существенные преимущества по сравнению с традиционными наземными методами полевых исследований. В процессе нашего исследования был разработан и апробирован пошаговый алгоритм пространственно-временного анализа динамики лесного покрова на территории Среднего Поволжья Российской Федерации. Для этого в работе была разработана и использована комплексная методика с использованием спутниковых снимков среднего пространственного разрешения и ретроспективного анализа с использованием большого объема данных.

В работе проведен обширный анализ существующих подходов и используемых данных (современных технологий и математических моделей) российских и зарубежных ученых, работающих в области исследования лесных экосистем. Литературный анализ позволил выявить состояние вопроса с оценкой лесного покрова в Среднем Поволжье, а также слабые стороны методики обработки данных спутниковой съемки среднего пространственного разрешения на региональном уровне. Данное исследование также помогло систематизировать большой объем информации по тематическому картографированию изменений, создать ГИС базу данных тестовых участков и проанализировать пространственное распределение изменений (нарушений) в лесном покрове на примере Среднего Поволжья.

По экспериментальным данным полевых исследований создана база данных тестовых участков, расположенных на территории лесничеств республик Марий Эл, Чувашии, Татарстана и Нижегородской области. Лесной покров изучаемой территории распределён крайне неравномерно. Уровень лесистости варьирует от 18 % (Республика Татарстан) до 54,6 % (Республика Ма-

рий Эл), что определяется почвенными условиями, рельефом и другими факторами. Данные характеристики необходимо принимать во внимание при тематическом картографировании, классификации спутниковых изображений разного пространственного разрешения и оценке нарушенности лесного покрова исследуемой местности.

На основе спутниковых снимков среднего пространственного разрешения Landsat сформированы тематические карты для 7 классов наземного (лесного) покрова за 1985, 2001 и 2014 гг. на исследуемую территорию республик и областей Среднего Поволжья. Предложенная пошаговая методика включает в себя эмпирическое линейное преобразование «Колпачок с кисточкой» (Tasseled Cap) для 6 каналов мультиспектральной спутниковой сцены в три отдельных изображения (яркость, зеленость и влажность). Полученные карты спутника Landsat отражают распределение лесных насаждений за три периода времени, составляющие в общей сложности 29 лет.

Сравнение тематических классов наземного (лесного) покрова показало общее уменьшение площадей светлохвойных насаждений на 4 % за все 29 лет. Одновременно с этим площадь мелколиственных и смешанных лесных насаждений уменьшились на 19 % и 8 % соответственно. Снижение по площади средневозрастных и спелых древостоев компенсируется ростом тематического класса молодняков, который за исследуемый период времени увеличился на 23 %. Общая точность управляемой классификации, проведенной в работе методом максимального правдоподобия, нескольких спутниковых изображений Landsat составила 84% при коэффициенте Каппа 0,82, что свидетельствует о высокой надежности полученных тематических данных и совпадении их с результатами наземных исследований.

В исследовании детально проработана методика оценки пространственно-временных изменений лесного покрова в Среднем

Поволжье. Полученные тематические слои лесных классов показали снижение площадей лесных насаждений на 7,45 % в результате вырубок и лесных пожаров 2010 г., а также их увеличение на 11,38 % в связи с процессами лесовозобновления на значительных площадях исследуемой территории.

Большое внимание в работе уделено пространственной оценке нарушенности лесного покрова. Для этого была использована серия разновременных спутниковых снимков среднего разрешения Landsat (1985, 1988, 1999, 2001, 2010, 2011, 2014). Оценка нарушений в лесном покрове была проведена на основе индекса нарушенности (DI – Disturbance Index). Формирование единого слоя лесной растительности представило собой компиляцию лесных масок, охватывающих все площади лесного покрова за 1985-2014 гг.

Установлено, что распределение нарушенных участков на разработанной тематической карте носит неравномерный характер. Только за небольшой период 2010-2014 гг. на исследуемой территории наблюдалось больше всего нарушений лесного покрова (4,8 % всей лесной территории). Главные события этого периода связаны с пожарами 2010 г., значительными площадями усыхающих еловых древостоев (свыше 8 тыс. га). Площадь нарушений лесного покрова в остальные периоды изменяется незначительно: 1,6 % (от площади всей лесной территории) за период 2001-2010 гг.; 1,2 % – за 1999-2001 гг.; 1,1 % – за 1988-1999 гг.; 0,8 % – за 1985-1988 гг.

Полученная ситуационная карта (интегрированная растровая карта нарушенности) лесного покрова на основе бивариантного статистического анализа растровых данных позволила определить степень корреляции между показателями выявленных нарушений лесного покрова в Среднем Поволжье.

В работе использован алгоритм оценки распределения и пространственной взаимосвязи объектов лесного покрова, получен-

ный на основе многофакторного анализа зависимости интегрированного показателя нарушенности лесного полога исследуемой территории от ее пространственных параметров. Мультиколлинеарность разработанных моделей подтверждается положительными результатами с использованием статистических методов наименьших квадратов (МНК) и географически взвешенной регрессией (ГВР).

Полученные данные отвергают нулевую гипотезу в пользу неслучайности распределения нарушений лесного покрова. Результаты пространственной автокорреляции разработанных моделей показывают низкие значения индекса Морана, который при отсутствии автокорреляции стремится к единице (для участков № 1,2,3,4 значения индекса равны 0,25; 0,34; 0,26; 0,24). В результате наблюдается пространственная локализация положительных значений стандартных отклонений в местах нарушенности лесного покрова (что подтверждается тематическими картами стандартных отклонений).

Разработанный алгоритм пространственно-временного анализа позволяет получать закономерности пространственных моделей изменения лесного покрова с учетом условно принятых независимых факторов. Результаты исследования показывают, что полученные статистические данные могут быть использованы в качестве достоверных моделей, описывающих изучаемые процессы в пространстве и во времени.

Предложенная методика пространственно-временного анализа лесного покрова с использованием данных спутниковых снимков среднего пространственного разрешения является важным шагом в процессе совершенствования лесоинвентаризационных работ и проведения мониторинга динамики лесного покрова. Применение геоинформационных комплексных программ ArcGIS и ENVI в анализе прогнозных данных и разновременных мультиспектральных спутниковых изображений позволяет вы-

являть основные факторы (биотические и абиотические), влияющие на происходящие изменения в лесном покрове на примере отдельных республик и областей региона Среднего Поволжья.

Алгоритм бивариантного картографирования растровых данных, предложенный в работе, может быть использован для оценки пространственных нарушений (вероятностных рисков) лесного покрова для других территорий. В этом случае применение ГИС методик и данных дистанционного зондирования позволяет группировать, анализировать и визуализировать полученную пространственную информацию с последующим получением статистически значимых математических уравнений пространственных взаимосвязей изучаемых явлений (нарушений в лесном покрове, динамики насаждений).

Для оценки пространственно-временных закономерностей и влияния различных факторов среды, влияющих на динамику лесного покрова, применяются геостатистические методы, включающие пошаговый процесс: геостатистический анализ данных, моделирование пространственных распределений на основе соответствующих статистик, выявление статистической зависимости и создание поверхности на основе интерполированных значений в виде цифровых карт.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие **рекомендации производству**:

Целесообразно использовать предложенный алгоритм пространственно-временной оценки динамики нарушенности лесного покрова по спутниковым снимкам при осуществлении лесного дистанционного мониторинга и планирования лесохозяйственных мероприятий на производстве. Разработанный пошаговый алгоритм позволит автоматизировать оценку лесных ресурсов, выявлять текущие изменения в лесном покрове и получать тематические карты лесного покрова.

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».

Использовать созданный набор данных нарушенных участков для комплексного анализа данных в сочетании с экономическими, экологическими или социальными факторами для прогнозирования развития ситуации в лесном секторе на примере республик Марий Эл и Чувашии.

Созданная тематическая карта динамики лесного покрова может быть использована Министерством природных ресурсов, экологии и охраны окружающей среды Республики Марий Эл и Министерством природных ресурсов и экологии Чувашской Республики как дополнительный информационный ГИС-ресурс для принятия решений по устойчивому лесопользованию.

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, предназначенных 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).

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.

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.

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, И.А. Распространение болезней в ельниках Волго-Вятского региона, пройденных рубками ухода / И.А. Алексеев, С.Ю. Бердинских // Леса Евразии в третьем тысячелетии: материалы международной конференции молодых ученых. – М., 2001. – Т.2 – С. 38-39.
2. Алексеев, И.А. Изменение встречаемости и особенности развития ксилотрофной микобиоты на Вятском увале / И.А. Алексеев, С.Ю. Бердинских // Научное обеспечение реализации национальных проектов в сельском хозяйстве: Всероссийская научно-практическая конференция. – Ижевск: ИжГСХА, 2006. – С. 319-324.
3. Алексеев, И.А. Качество и эффективность рубок ухода ельников Вятско-Марийского увала: биологический аспект // И.А. Алексеев, С.Ю. Бердинских // Аграрный вестник Урала. – 2008. – №5 (47). – С. 50-53.
4. Алексеев, И.А. Оценка качества рубок ухода в смешанных молодняках Среднего Поволжья. / И.А. Алексеев, С.Ю. Бердинских, А.Н. Чешуин, Е.Н. Чешуин, К.В. Вахрушев // Рациональное лесопользование и защита лесов в Среднем Поволжье: материалы научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения проф. И.А. Алексеева. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – С. 127-135.
5. Алексеев, И.А. Причины поражения болезнями хвойных насаждений Вятско-Камского региона / И.А. Алексеев, С. Ю. Бердинских // Научное обеспечение реализации национальных проектов в сельском хозяйстве: Всероссийская научно-практическая конференция. – Ижевск: ИжГСХА, 2006. – С. 324-327.
6. Андреев, Д.Н. Методика комплексной диагностики антропогенной трансформации особо охраняемых природных территорий / Д.Н. Андреев // Географический вестник. – 2012. – №4 (23). – С. 1-7.
7. Ануфриев, М.А. Опыт использования космических снимков при таксации лесов / М.А. Ануфриев // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: материалы международной конферен-

ции с элементами научной школы для молодёжи. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. – С. 131-134.

8. Ануфриев, М.А. Совершенствование мониторинга лесопользования на основе материалов космических съёмок в условиях Республики Марий Эл: автореф. дис... канд. с.-х. наук / М.А. Ануфриев; Марийский государственный технический университет. – Йошкар-Ола, 2007. – 26 с.

9. Бажин, О.Н. Продуктивность искусственных древостоев сосны в условиях Предкамья Республики Татарстан / О.Н. Бажин, А.С. Туев // Современные проблемы почвоведения и экологии: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения д-ра с.-х. наук, проф. В. Н. Смирнова. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – Ч. 1. – С. 132-133.

10. Бажин, О.Н. Свойства бурых лесных почв и их влияние на рост культур сосны и ели / О.Н. Бажин // Рациональное лесопользование и защита лесов в Среднем Поволжье: материалы научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения д-ра с.-х. наук, проф. Ивана Алексеевича Алексеева. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. – С. 145-150.

11. Барталев, С.А. Разработка методов оценки состояния динамики лесов на основе данных спутниковых наблюдений: автореф. дис... д-ра техн. наук / С.А. Барталев; Институт космических исследований Российской академии наук. – М., 2007. – 48 с.

12. Барталев, С.А. Разработка информационной системы поддержки мониторинга состояния и динамики наземных экосистем Северной Евразии по данным спутниковых наблюдений / С.А. Барталев, М.А. Бурцев, Е.А. Лупян, А.А. Прошин, И.А. Уваров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – № 1. – С. 131-139.

13. Барталев, С.А. Современные возможности спутникового мониторинга динамики бореальных лесных экосистем севера Евразии / С.А. Барталев, А.С. Исаев // Proceeding of International Conference “Anthropogenic Transformation of Taiga Ecosystems in Europe: Environmental, Resource and Economic Implications”. 23-25 November, 2004. – Petrozavodsk. – P. 12.

14. Бровкина, О.В. Дистанционный мониторинг антропогенных нарушений таежной зоны Северо-Запада России: автореф. дис... канд. географ. наук / О.В. Бровкина; Санкт-Петербургский научно-исследовательский Центр экологической безопасности. – Санкт-Петербург, 2011. – 48 с.

15. Верхунов, П.М. Таксация леса: учебное пособие / П. М. Верхунов, В. Л. Черных. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. – 396 с.

16. 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: – № 1. – 2012. – С. 12-22.

17. Воробьев, О.Н. Методика выявления степени повреждения древостоев после пожаров 2010 года в Среднем Поволжье / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Том 11, № 4. – С. 217-229.

18. 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.

19. Газизуллин, А.Х. Почвенно-экологические условия формирования лесов Среднего Поволжья: автореф. дис... д-ра с.-х. наук. / А.Х. Газизуллин; Йошкар-Ола, 1993. – 50 с.

20. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высшее образование, 2005. – 400 с.

21. Голубятников, Л.Л. Модельные оценки влияния изменений климата на растительный покров и сток углерода из атмосферы / Л.Л. Голубятников, И.И. Мохов, Е.А. Денисенко, В.А. Тихонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2005. – Том 41, №1. – С. 22-32.

22. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2014 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecogosedoklad.ru/2014/> 10.08.2015.

23. 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 технический государственный университет. – 2011. – С. 7-18. – <http://csfm.marstu.net/publications.html>

24. Губаев, А.В. Оценка и мониторинг лесного покрова по спутниковым снимкам среднего и высокого пространственного разрешения (на примере Среднего Поволжья): автореф. дис... канд. с.-х. наук / А.В. Губаев; Поволжский государственный технологический университет. – Йошкар-Ола, 2015. – 15 с.

25. Демаков, Ю.П. Пространственная структура лесного фонда Республики Марий Эл / Ю.П. Демаков, А.Е. Смыков, С.А. Денисов // Вестник МарГТУ. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2008. – № 1(2). – С. 3-18.

26. Демаков, Ю.П. Структура молодняков искусственного происхождения сосны и ели в Марийском ополье и ее оптимизация / Ю.П. Демаков, Т.В. Нуреева, А.А. Белоусов // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – №93(09). – С. 1-17.

27. Демаков, Ю.П. Эколого-ресурсный потенциал древостоев лесообразующих пород Среднего Поволжья / Ю.П. Демаков, А.В. Исаев, В.Л. Черных // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2014. – №4(24). – С. 5–20.

28. Денисов, С.А. Динамика формационной структуры березняков в связи с их онтогенезом в различных эдатопах в Среднем Поволжье // С.А. Денисов / Вестник МарГТУ. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2009. – № 3(7). – С. 13-27.

29. Денисов, С.А. Естественное возобновление сосны в Пензенской области / С.А. Денисов, В.М. Егоров. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – 168 с.

30. Денисов, С.А. Особенности роста плантационных культур ели при выращивании балансовой древесины в связи с лесоводственными уходами / С.А. Денисов, Ю.П. Глушкова // Вестник МарГТУ. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2011. – № 1. – С. 31-38.

31. Денисов, С.А. Проблемы воспроизводства сосновых лесов Среднего Поволжья / С.А. Денисов, К.К. Калинин, В.П. Бессчетнов, Н.В. Демичева, Т.С. Батухтина, В.В. Самоделкина // Вестник МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2012. – № 1. – С. 12-23.
32. Денисов, С.А. Управление лесовосстановлением на гарях / С.А. Денисов, Т.А. Конюхова, Т.С. Рачкова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2015. – № 3 (27). – С. 5-14.
33. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 / Федеральная служба по Гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – М., 2014. – 9 с.
34. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2013 год / Департамент экологической безопасности, природопользования защиты населения Республики Марий Эл. – Йошкар-Ола, 2014. – 188 с.
35. Доклад об экологической ситуации в Чувашской Республике в 2014 году / Министерство природных ресурсов и экологии Чувашской Республики. – Чебоксары, 2015. – 79 с.
36. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М: Издательский дом «Вильямс», 2007.
37. Дробушевская, О.В. Опыт использования данных TERRA/Modis для сравнения фенологических ритмов светлохвойной подтайги и темнохвойной тайги Приенисейской части Саян / О.В. Дробушевская, Е.И. Пономарев // Ботанические исследования в Сибири. – Красноярск: Красноярское отделение Российского ботанического общества, 2006. – вып. 14. – С. 35-38.
38. 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.
39. Елсаков, В.В. Растительный покров Югорского полуострова в условиях климатических изменений последних десятилетий / В.В. Елсаков, Е.Е. Кулюгина // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 3. – С. 65-77.

40. Ершов, Д.В. Основные принципы построения информационной системы дистанционного мониторинга биологического разнообразия лесов России / Д.В. Ершов, Н.В. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 2. – С. 46-60.

41. Жирин, В.М. Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйдлина // Лесоведение. – 2016. – № 1. – С. 3-12.

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

43. 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.

44. 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.

45. Жирин, В.М. Особенности восстановления нарушенного лесного покрова в таёжных лесах Русской равнины / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйдлина // Разнообразие и мониторинг лесных экосистем России; М.: Товарищество научных изданий КМК, Т.1. – 2012. – С. 352-381.

46. Жирин, В.М. Дистанционное сопровождение лесобразовательного процесса в послерубочных таежных лесах Русской равнины / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйдлина // Лесоведение. – 2011. – №6. – С. 29-38.

47. Закамский, В.А. Разработка лесосек равномерно-постепенным деланочным методом на особо охраняемых территориях / В.А. Закамский // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной Вестник. – 2012. – №2(85). – С.72-75.

48. Иванов, В.А. Влияние нарушенных лесных территорий на частоту пожаров в Нижнем Приангарье / В.А. Иванов, С.А. Москальченко // Хвойные бореальной зоны. – 2009. – XXVI, № 2. – С. 249-254.
49. Исаев, А.С. Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / А.С. Исаев. – М: Наука, 2008. – 454 с.
50. Калинин, К.К. Естественное лесовозобновление и формирование молодняков в еловых и березовых насаждениях на крупных гарях Среднего Заволжья / К.К. Калинин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2010. – №1. – С. 5-15.
51. Коломыц, Л.С. Устойчивость лесных экосистем, методы ее исчисления и картографирования / Л.С. Коломыц, Э.Г. Шарая // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 1. – С. 93-107.
52. Кондранин, Т. В. Распознавание природно-техногенных объектов по данным гиперспектральных систем аэрокосмического зондирования / Т.В. Кондранин, В.В. Козодеров, Е.В. Дмитриев // Математические методы распознавания образов: 15-я Всероссийская конференция, г. Петрозаводск, 11-17 сентября 2011 г. — М.: МАКС Пресс, 2011. – С. 551-554.
53. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года. – 2008 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ifap.ru/ofdocs/rus/rus006.pdf> 12.12.2018.
54. Курбанов, Э.А. Дистанционный мониторинг динамики нарушенный лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье / Э.А. Курбанов, Т.В. Нуреева, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Т.Ф. Мифтахов, С.А. Незамаев, Ю.А. Полевщикова // Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – 2011. – №3. – С.17-24.
55. Курбанов Э.А. Лесоводство. Международное лесное хозяйство: учебное пособие. Рекомендовано УМО по образованию в области лесного дела / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев / Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. – 254 с.
56. Курбанов, Э.А. Моделирование бюджета углерода лесных насаждений на примере сосняков Поволжья / Э.А. Курбанов // Лесной журнал – 2009. – № 2. – С. 7-15.

57. Курбанов, Э.А. Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев, Т.А. Александрова // Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – 2010. – № 2(9). – С. 14-20.

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

59. Курбанов, Э.А. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т 13(1). – С. 1-15.

60. Курбанов, Э.А. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева// Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 1(21). – С. 18-32.

61. 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.

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

63. Лабутина, И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков / И.А. Лабутина. – М.: Аспект Пресс, 2004. – 184 с.

64. Лежнин, С.А. Динамика спектральных характеристик лесного покрова молодняков Марийского Заволжья по спутниковым снимкам / С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международного научно-практического семинара [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2011. – С.19-23.

65. Лежнин, С.А. Дистанционный метод оценки формирования молодняков на залежах Марийского лесного Заволжья по спутниковым снимкам: автореф. дис... канд. с.-х. наук. / С.А. Лежнин; Поволжский государственный технологический университет. – Йошкар-Ола, 2013. – 17 с.
66. Лесной кодекс Российской Федерации [от 04.12.2006 N 200-ФЗ]. – М., 2006.
67. Лесной план Республики Марий Эл: [утвержден распоряжением Главы РМЭ 16 окт. 2012 г.]. – Йошкар-Ола, 2012. – 372с.
68. Лесоустроительная инструкция [от 12.12.2011N 516-ФЗ]. – М., 2012.
69. Лупян, Е.А. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности / Е.А. Лупян, И.Ю. Савин, С.А. Барталев, В.А. Толпин, И.В. Балашов, Д.Е. Плотников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: ИКИ РАН. – 2011. – Т.8, № 1. – С. 190–198.
70. Магнус, Я.Р. Эконометрика / Я.Р. Магнус, П.К. Картышев. М: Дело, 2004. — 576 с.
71. Марийский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://maripogoda.ru/klimat-respubliki> 10.09.2018.
72. Мастицкий, С.Э. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R / С.Э. Мастицкий, В.К. Шитиков. – Казань, 2014. – 401 с.
73. Методические рекомендации по проведению государственной инвентаризации лесов: приказ Рослесхоза от 06.06.2011 № 207.
74. Незамаев, С.А. Оценка пространственно-временной динамики фитомассы лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам: автореф. дис... канд. с.-х. наук / С.А. Незамаев; Поволжский государственный технологический университет. – Йошкар-Ола, 2013. – 24 с.
75. Никитина, Ю.В. Разработка и исследование технологии мониторинга динамики лесных экосистем по материалам дистанционного зондирования: автореф. дис... канд. техн. наук / Ю.В. Никитина; Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск, 2007. – 17 с.

76. Пахучий, В.В. Развитие методов ГИС и дистанционных технологий для целей гидролесомелиоративных исследований / В.В. Пахучий, Д.А. Шевелев // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2015. – № 41. – С. 65-68.

77. Пахучий, В.В. Лесоводство на заболоченных участках / В.В. Пахучий, Л.М. Пахучая. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ. – 2017. – 232 с.

78. Пахучий, В.В. Оценка соотношения лесного и других типов растительности в северных районах Республики Коми в конце XX – начале XXI века / В.В. Пахучий, В.М. Щанов // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: – Йошкар-Ола, 2017. – С. 121-130.

79. Пахучий, В.В. Использование вегетационных индексов для целей гидролесомелиоративных исследований / В.В. Пахучий, Л.М. Пахучая, Д.А. Шевелев // Вестник Московского государственного университета леса. – 2016. – Т. 20, № 1. – С. 17-23.

80. Переведенцев, Ю.П. Изменения климатических условий и ресурсов Среднего Поволжья: учебное пособие по региональной климатологии / Ю.П. Переведенцев, М.А. Верещагин, К.М. Шанталинский, Э.П. Наумов, Ю.Г. Хабутдинов. – Казань, 2011. – 149 с.

81. Полевщикова, Ю.А. Анализ динамики растительного покрова по данным спутниковой съемки / Ю.А. Полевщикова, С.А. Меньшиков // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия Технологическая. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. – С.38-42.

82. Полевщикова, Ю.А. К вопросу пространственно-временного анализа землепользования по данным дистанционного зондирования // Ю.А. Полевщикова, Р.Р. Валиуллина // Лесные экосистемы в изменении климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник материалов международного научно-практического семинара [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: Марийский технический государственный университет – 2011. – С. 24 - 27. url: <http://csfm.marstu.net/publications.html>

83. Полевщикова, Ю.А. Оценка лесного покрова Волжского лесничества Республики Марий Эл методами дистанционного зондирования / Ю.А. Полевщикова, О.М. Акбаров // Электронный журнал «NB: Кибернетика и программирование», рубрика «Компьютерная графика,

обработка изображений и распознавание образов» [Электронный ресурс]. – Москва NotaBene. – 2013. – №3. – url: http://e-notabene.ru/kp/article_9333.html

84. Полевщикова, Ю.А. Оценка нарушенности лесного покрова Марийского Заволжья методами дистанционного зондирования на основе ГИС технологий / Ю.А. Полевщикова // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: сборник материалов всероссийской научно-практической интернет-конференции [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2013. – url: <http://csfm.marstu.net/publications.html>

85. Полевщикова, Ю.А. Пространственная динамика лесного покрова на примере Кировской области по данным дистанционного зондирования / Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: Йошкар-Ола, 2015. – С. 10-16.

86. Проект Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [Электронный ресурс] – url: <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp> 23.09.2018

87. Романов, Е.М. Искусственное лесовосстановление в Среднем Поволжье: состояние и задачи по совершенствованию / Е.М. Романов, Т.В. Нуреева, Н.В. Еремин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2013. – №3(19). – С. 5–19.

88. Руководство по планированию, организации и ведению лесопатологических обследований: приказ Рослесхоза от 29.12.2007 № 523. – Москва, 2007.

89. Савельев, А.А. Геостатистический анализ данных в экологии и природопользовании (с применением пакета R) / А.А. Савельев, С.С. Мухарамова, А.Г. Пилюгин, Н.А. Чижилова: учебное пособие. – Казань. – 2012. – 120 с.

90. Смирнов, В.Н. Почвы Марийской АССР, их генезис, эволюция и пути их улучшения / В.Н. Смирнов. – Йошкар-Ола: Маркнигоиздат, 1968. – 531 с.

91. Спивак, Л.Ф. Мониторинг долговременных изменений растительного покрова аридных и полуаридных зон Казахстана с использовани-

ем данных дистанционного зондирования / Л.Ф. Спивак, И.С. Витковская, А.Г. Терехов, М.Ж. Батырбаева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: ИКИ РАН. – 2011. – Т.8. – № 1. – С. 163-169.

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

93. Сухих, В.И. Научные основы и первые результаты дистанционного мониторинга незаконных рубок леса / В.И. Сухих, М.Д. Гиряев, В.И. Архипов, Е.М. Атаманкин, В.И. Березин, М.В. Дворяшин, В.М. Жирин, И.М. Потапов, В.М. Скудин, А.А. Соболев, А.В. Шаталов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Том 3, № 1. – С. 32-38.

94. Сухих, В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учеб. / В.И. Сухих. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – 390 с.

95. 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.

96. Терехин, Э.А. Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съёмок /Э.А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 112-124.

97. Терехин, Э.А. Анализ каналов спутниковых данных Landsat TM для оценки характеристик лесных насаждений лесостепной провинции Среднерусской возвышенности / Э.А. Терехин // Исследование Земли из космоса. – 2012. – №2. – С. 53-61.

98. Терехин, Э.А. Анализ текстурных признаков земельных угодий по космическим снимкам Landsat TM / Э.А. Терехин // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2010. – №8. – С. 47-52.

99. Тетерюк, Л.В. Роль рельефа в формировании растительности карстовых ландшафтов Европейского северо-востока России / Л.В. Тете-

рюк, В.В. Елсаков // Исследование Земли из Космоса. – 2012. – №3. – С. 78-93.

100. Тетюхин, С.В. Анализ структуры и пространственно-временной динамики лесных растительных сообществ на примере учебно-опытного лесничества Ленинградской области / С.В. Тетюхин // Структура и динамика растительных сообществ: материалы всероссийской конференции. – 2012. – Том 2. – С. 312-314.

101. Тетюхин, С.В. Данные дистанционного зондирования как основа для обоснования долговременных инвестиций в лесной комплекс / С.В. Тетюхин, Е.Г. Гладков, Ю.П. Тютиков // Земля из космоса — наиболее эффективные решения: сборник тезисов. – М.: Инженерно-технологический Центр СканЭкс, НП «Прозрачный мир», Издательство Бином, 2011. – С. 197-199.

102. Федеральная целевая программа «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2015 года: постановление Правительства РФ от 07.07.2011 №555 (ред. от 25.04.2015)

103. Фомин, В.В. Пространственно-временная динамика верхней границы леса на Южном Урале во второй половине XX века / В.В. Фомин, Д.С. Капралов, М.М. Терентьев, А.А. Барова, А.В. Устинов, Н.Е. Циммерманн // Геоинформатика. – 2007. – № 1. – С. 56-60.

104. Хамедов, В.А. Возможности использования данных ДЗЗ и ГИС-технологий в лесном хозяйстве / В.А. Хамедов, Ю.М. Полищук, И.В. Рощупкина, С.В. Шимов // Обратные задачи и информационные технологии рационального природопользования: материалы 3-й научно-практической конференции. – Ханты-Мансийск: НИИ инф. технол, 2006. – С. 165-170.

105. Хлюстов, В.К. Автоматизированная система лесоводственно-таксационных нормативов для инвентаризации древостоев по элементам леса. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012613879. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25 апреля 2012 г.

106. Хлюстов, В.К. Многомерные закономерности текущей актуализации таксационных показателей древостоев. Лесотаксационный справочник: учебное пособие / В.К. Хлюстов, М.М. Устинов, Д.В. Хлюстов. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2013. – 141 с. (гриф УМО)

107. Черных, В.Л. Геоинформационные системы в лесном хозяйстве: учебное пособие / В.Л. Черных. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – 202 с.
108. Чернякевич, Л.М. Организационно-экономические аспекты управления лесным хозяйством [Электронный ресурс] / Л.М. Чернякевич. – 2009. – URL: <http://csfm.marstu.net/elearning/>
109. Чернякевич, Л.М. Экономическое обоснование форм организации ведения лесного хозяйства / Л.М. Чернякевич // Лесной Вестник. Московский государственный университет леса. – 2004. – №4. – С. 121-128.
110. Чистяков, А.Р. Типы лесов Марийской АССР и сопредельных районов / А.Р. Чистяков, А.К. Денисов. – Йошкар-Ола, 1959. – 73 с.
111. Чувашский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://www.meteo21.ru/> 10.09.2018.
112. Чумаченко, С.И. Исследование динамических процессов лесных экосистем средствами имитационного моделирования как метод мониторинга лесных объектов // Мониторинг состояния лесных и городских экосистем: монография / С.И. Чумаченко, В.Н. Коротков, М.М. Паленова –М.: МГУЛ, 2004. – С. 132-157.
113. Чумаченко, С. И. Моделирование развития насаждений в ходе аутогенных сукцессий / С. И. Чумаченко, О. В. Смирнова // Лесоведение. – 2009. – № 6. – С. 3-17.
114. Шалабанов, А.К. Эконометрика: учебно-методическое пособие / А.К. Шалабанов, Д.А. Роганов. – Казань, 2008. – 25 с.
115. Шарая, Л.С. Количественный анализ пространственной изменчивости некоторых параметров состояния экосистемы Жигули / Л.С. Шарая // Самарская Лука. – 2007. – Т. 16, № 4(22). – С. 639-659.
116. Шарая, Л.С. Прогнозное картографирование лесных экосистем (Ландшафтно-экологический подход) / Л.С. Шарая // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 3. – С. 38-47.
117. 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.
118. Ширнин, Ю.А. Моделирование процедуры выбора технологий рубок леса с использованием ГИС / Ю.А. Ширнин, Н.И. Роженцова //

Йошкар-Ола: Вестник МарГТУ. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2007. – №1. – С. 40-49.

119. Ярошенко, А.Ю. Малонарушенные лесные территории европейского Севера России / А.Ю. Ярошенко, П.В. Потапов, С.А. Турубанова. – М., 2001. – 75 с.

120. Яцерук, А.В. Дистанционный мониторинг лесных экосистем на основе лазерного зондирования / А.В. Яцерук // Проблемы использования и охраны природных ресурсов Центральной Сибири: сборник статей. – Красноярск, 2004. – С. 167-168.

121. Agumaya, A. A risk-based approach to assessing the 'fitness for use of spatial data / A. Agumaya, G.J. Hunter // URISA Journal. – 1999. – №11. – P. 33-44.

122. Ahlqvist, O. Extending post-classification change detection using semantic similarity metrics to overcome class heterogeneity: A study of 1992 and 2001 U.S. National Land Cover Database changes / O. Ahlqvist // Remote Sensing of Environment. – 2011. – Vol. 112. – P. 1226-1241.

123. 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.

124. Amos, C. Determining the use of Sentinel-2A MSI for wildfire burning & severity detection / C. Amos, G.P. Petropoulos, K.P. Ferentinos // International Journal of Remote Sensing. – 2019. – Vol. 40. – №3. – P. 905-930.

125. Andy, M. The ESRI Guide to GIS Analysis / M. Andy // ESRI Press. – 2005. – Vol. 2. – 252 p.

126. Asmamaw, L.B. Land use/cover dynamics and their effects in the Gerado catchment, northeastern Ethiopia / L.B. Asmamaw, M. Assen, L. Tamene // International Journal of Environmental Studies. – 2011. – Vol. 68, № 6. – P.883-900.

127. Bhagata, V. S. Use of Landsat ETM+ data for detection of potential areas for afforestation. // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – Vol. 30, № 10. – P. 2607-2617.

128. Bonham-Carter, G.F. Weights of evidence modelling: A new approach to mapping mineral potential / G.F. Bonham-Carter, F.P. Agterberg,

D.F. Wright // Statistical Applications in Earth Sciences 89(9). Bonham-Carter. – 1994. – P. 171-183.

129. Bossard, M. CORINE land cover technical guide - Addendum 2000 / M. Bossard, J. Feranec, J. Otahel // Technical Report. – 2000. – № 40. – 105 p.

130. Bradley, B. Relationships between expanding pinyon-juniper cover and topography in the central Great Basin, Nevada / B.A. Bradley, E. Fleishman // Journal of Biogeography. – 2008. – Vol. 35. – P. 951-964.

131. Cano, E. Improved forest-cover mapping based on MODIS time series and landscape stratification/ E. Cano, J.P. Denux, M. Bisquert, L. Hubert-Moy, V. Chéret // International Journal of Remote Sensing. – 2017. – Vol. 38(7). – P. 1865-1888.

132. Chai, D. Cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery based on deep convolutional neural networks / D. Chai, S. Newsam, H.K. Zhang, Y. Qiu, J. Huang / Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 225. – P. 307-316.

133. Chen, B. Characterizing spatial representativeness of flux tower eddy-covariance measurements across the Canadian Carbon Program Network using remote sensing and footprint analysis / B. Chen, N.C. Coops, D. Fu, H.A. Margolis, B.D. Amiro, T.A. Black, M.A. Arain, A. G. Barr, C.P.-A. Bourque, L.B. Flanagan, P.M. Lafleur, J.H. McCaughey, S.C. Wofsy // Remote Sensing of Environment. – 2012. – 124.– P. 742-755.

134. Chen, D. Mapping post-disturbance stand age distribution in Siberian larch forest based on a novel method / D. Chen, T.V. Loboda, A. Krylov, P. Potapov // American Geophysical Union, Fall Meeting. – 2014. – P. GC31B-0465.

135. Childs, C. Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst / C. Childs // ArcUser. – 2004. – P.32-35.

136. Cihlar, L. Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities / L. Cihlar // International Journal of Remote Sensing. – 2000. – Vol. 21, №. 6&7. – P. 1093-1114.

137. de Sousa, W.R.N. Creation of a coastal evolution prognostic model using shoreline historical data and techniques of digital image processing in a GIS environment for generating future scenarios / W. R.N. de Sousa, M.V.S. Souto, S.S. Matos, C. R. Duarte, A.R. G. N. L. Salgueiro, C.A. da

Silva Neto // International Journal of Remote Sensing. – 2018. – Vol. 39, № 13. – P. 4416-4430.

138. Devillers, R. Towards spatial data quality information analysis tools for experts assessing the fitness for use of spatial data / R. Devillers, Y. Bedard, R. Jeansoulin, B. Moulin // International Journal of Geographical Information Science. – 2007. – № 21. – P. 261-282.

139. Dorman, C.F. Effects of incorporating spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data / C.F. Dormann // Global Ecology and Biogeography. – 2007. – №16. – P. 129-138.

140. Duong, N. Land cover category definition by image invariants for automated classification / N. Duong // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2000. – Vol. XXXIII, Part B7. – P. 985-992.

141. Eastmen, C.M. Building product model / C.M. Eastmen // Georgia Institute of Technology. USA. – 1999. – 47 p.

142. Eisfeldera, C. Towards automated forest-type mapping - a service within GSE Forest Monitoring based on SPOT-5 and IKONOS data / C. Eisfeldera, T. Krausa // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – Vol. 30, № 19. – P. 5015 - 5038.

143. Elmore, A.J. Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments: Precision and Accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index / A.J. Elmore, J.F. Mustard, S.J. Manning, D. B. Lobell // Remote Sensing of Environment. – 2000. – №73. – P. 87-102.

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

145. Fatihaa B. Spatio temporal analysis of vegetation by vegetation indices from multi-dates satellite images: Application to a semi-arid area in Algeria / B. Fatihaa, A. Abdelkaderb, H. Latifac, E. Mohamed // Energy Procedia. – 2013. – Vol. 36. – P. 667-675.

146. Fei, Y. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing / Y. Fei, Kali E. Sawaya, Brian C. Loeffelholz, Marvin E. Bauer // Remote Sensing of Environment. – 2005. – Vol. 98. – P. 317-328.

147. Fensholt, R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends — Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series / R. Fensholt , S.R. Proud // *Remote Sensing of Environment*. — 2012. — Vol. 119. — P. 131–147.
148. Fernández-García, V. Burn severity metrics in fire-prone pine ecosystems along a climatic gradient using Landsat imagery / V. Fernández-García, M. Santamarta, A. Fernández-Mansob, C. Quintanoc, E. Marcosa, L. Calvo // *Remote Sensing of Environment*. — 2018. — Vol. 206. — P. 205–217.
149. Fotheringham, S.A. Geographically Weighted Regression: the analysis of spatially varying relationships / S.A. Fotheringham, C. Brunsdon, M. Charlton // John Wiley & Sons, 2002.
150. Franklin, S.E. Remote sensing methods in medium spatial resolution satellite data land cover classification of large areas / S.E. Franklin, M.A. Wulder // *Progress in Physical Geography*. — 2002. — № 26. — P. 173–205.
151. 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.cbmjournal.com/content/8/1/3>
152. Gao, J. Detecting spatially non-stationary and scale-dependent relationships between urban landscape fragmentation and related factors using Geographically Weighted Regression / J. Gao // *Applied Geography*. — 2011. — №31. — P. 292–302.
153. Giles, M. Status of land cover classification accuracy assessment / Giles M. Foody // *Remote Sensing of Environment*. — 2002. — Vol. 80. — P. 185–201.
154. Gong, C. Determining socioeconomic drivers of urban forest fragmentation with historical remote sensing images / C. Gong, S. Yu, H. Joesting, J. Chen // *Landscape and Urban Planning*. — 2013. — №117. — P. 57–65.
155. Guariguata, M. Mitigation needs adaptation: Tropical forestry and climate change / M.R. Guariguata, J.P. Cornelius, B. Locatelli, C. Forner // *Mitigation Adaption Strategy Global Change*. — 2008. — №13. — P. 93–808.

156. Guindon, L. Annual mapping of large forest disturbance across Canada's forests using 250 m MODIS imagery from 2000 to 2011 / L. Guindon, P.Y. Bernier, A. Beaudoin, D. Pouliot, P. Villemaire, R.J. Hall, R. Latifovic, R. St-Amant // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2014. – №44 (12). – P. 1545-1554.

157. Griffiths, P. Forest disturbances, forest recovery, and changes in forest types across the Carpathian ecoregion from 1985 to 2010 based on Landsat image classification / P. Griffiths, T. Kuemmerle, M. Baumann, V.C. Radeloff, I.V. Abrudan, J. Lieskovsky, C. Munteanu, K. Ostapowicz, P. Hostert // *Remote Sensing of Environmet*. – 2014. – Vol. 151. – P. 72-88.

158. Hai-Hoa, N. The relationship of spatial temporal changes in fringe mangrove extent and adjacent land-use: Case study of Kien Giang coast, Vietnam / N. Hai-Hoa, C. McAlpine, D. Pullar, K. Johansen, N.C. Duke // *Ocean Coastal Management*. – 2013. – №76. – P. 12-22.

159. Hansen, M.C. Detecting long-term Global forest change using continuous fields of tree-cover maps from 8-km advanced very high resolution radiometer (AVHRR) data for the years 1982-99 / M.C. Hansen, R.S. DeFries // *Ecosystems*. – 2004. – № 7. – P. 695-716.

160. Hansen, M. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data / M.C. Hansen, T.R. Loveland // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – №122. – P. 66-74.

161. Healey, S. P. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat Data Structures for Use in Forest Disturbance Detection / S. P. Healey, W. B. Cohen, Y. Zhiqiang, O. N. Krankina // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – №97. – P. 301-310.

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

163. Heywood, I. An introduction to geographical information systems / I. Heywood, S. Cornelius, S. Carver // Pearson Education Limited, England, third edition. – 2006. – 426 p.

164. Holmstrom, L. Modeling and Data Analysis Methods for Satellite Based Forest Inventory (MODAFOR) / L. Holmstrom, M. Hallikainen, E. Tomppo // *Final Report*. – 2003. – № 19. – 25 p.

165. Hostert, P. Coupling spectral unmixing and trend analysis for monitoring of long-term vegetation dynamics in Mediterranean rangelands / P. Hostert, A. Roder, J. Hill // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – № 87. – P. 183-197.
166. Hostert, P. Rapid land use change after socio-economic disturbances: the collapse of the Soviet Union versus Chernobyl / P. Hostert, T. Kuemmerle, A. Prishchepov, A. Sieber, E.F. Lambin, V.C. Radeloff // *Environmental Research Letters*. – 2011. – № 6(4). – 8 p.
167. Hosillo A. Post-fire vegetation response as a proxy to quantify the magnitude of burn severity in tropical peatland / A. Hosillo, K.J. Tansey, S.E. Page // *International Journal of Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 34(2). – P. 412-433.
168. Hou, Z. Extraction of remote sensing-based forest management units in tropical forests / Z. Hou, Q. Xu, T. Nuutinen, T. Tokola // *Remote Sensing of Environment*. – 2013. – Vol. 130. – P. 1-10.
169. Huang, C. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at satellite reflectance / C. Huang, B. Wylie, C. Homer, L. Yang, G. Zylstra // *International journal of remote sensing*. – 2002. – № 23. – P. 1741–1748.
170. Im, J. Objectbased change detection using correlation image analysis and image segmentation / J. Im, J.R. Jensen, J. A. Tullis // *International Journal of Remote Sensing*. – 2008. – Vol. 29, № 2. – P. 399-423.
171. 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 open access*. – 2016. – Vol. 8, № 166. – P. 2 - 27.
172. IPCC. International Panel on Climate Change [Electronic resource]. – 2014. – url: <http://www.ipcc.ch/> 05.02.2019.
173. IPCC. International Panel on Climate Change. Special report: Global Warming of 1.5⁰C [Electronic resource]. – 2018. – url: <http://www.ipcc.ch/> 05.04.2019.
174. IPCC. International Panel on Climate Change. Climate change and Land [Electronic resource]. – 2019. – url: <http://www.ipcc.ch/> 28.07.2019.
175. Jardine, K. The Carbon Bomb: Climate Change and the Fate of the Boreal Forests [Electronic resource] / K. Jardine // *Report of Stitching*

Greenpeace Council. – 1994. – url: <http://www.dhushara.com/book/diversit/extra/carb.htm>

176. Jebur, M.N. An integrated user-friendly ArcMAP tool for bivariate statistical modelling in geoscience applications / M.N. Jebur, B. Pradhan, H.Z.M. Shafri, Z.M. Yusoff, and M.S. Tehrany // *Geosci. Model Dev.* – 2015. – №8. – P. 881-891.

177. Jong, S. An integrated spatial and spectral approach to the classification of Mediterranean land cover types / S.M. de Jong, T. Hornstra, H.G. Maas // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* – 2001. – Vol. 3, № 2. – P. 176-183.

178. Junttilaa, V. Bayesian principal component regression model with spatial effects for forest inventory variables under small field sample size / V. Junttilaa, M. Lainea // *Remote Sensing of Environment.* – 2017. – Vol. 192. – P. 45–57.

179. Kasischke, E.S. Evaluation of the composite burn index for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests / E.S. Kasischke M.R. Turetsky, R.D. Ottmar, N.H.F. French, E.E. Hoy, E.S. Kane // *International Journal of Wildland Fire.* – 2008. – Vol. 17. – P. 515–526.

180. Kahneman, D. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases / D. Kahneman, P. Slovic, A. Tversky // Cambridge University Press, 1982. – 544 p.

181. Kharol, S. Influence of land use/land cover (LULC) changes on atmospheric dynamics over the arid region of Rajasthan state, India / S.K. Kharol, D.G. Kaskaoutis, K.V.S. Badarinath, A.R. Sharma, R.P. Singh // *Journal of Arid Environments.* – 2013. – №88. – P. 90-101.

182. 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.

183. Kisaka, M. Potential of deterministic and Geostatistical rainfall interpolation under high rainfall variability and dry spells: case of Kenya's Central Highlands / M.O. Kisaka, M. Mucheru-Muna, F.L. Ngetich, J. Mugwe, D. Mugendi, F. Mairura, C. Shisanya, G.L. Makokha // *Theoretical and Applied Climatology.* – 2015. – P. 1-16.

184. Knorn, J. Forest restitution and protected area effectiveness in post-socialist Romani / J. Knorn, T. Kuemmerle, V.C. Radeloff, A. Szabo,

M. Mindrescu, W.S. Keetone, I. Abrudan, P. Griffiths, V. Gancz, P. Hostert // *Biological Conservation*. – 2012. – №146. – P. 204-212.

185. Krankina, O.N. Effects of climate, disturbance, and species on forest biomass across Russia / O.N. Krankina, R.A. Houghton, M.E. Harmon, E.H. Hogg, D. Butman, M. Yatskov, M. Huso, R.F. Treyfeld, V.N. Razuvaev, G. Spycher // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2005. – №35(9). – P. 2281-2293.

186. Krankina, O.N. Vegetation Cover in the Eurasian Arctic: Distribution, Monitoring, and Role in Carbon Cycling / O.N. Krankina, D. Pflugmacher, D.J. Hayes, A.D. McGuire, M.C. Hansen, T. Hame, V. Elsakov, P. Nelson // *Vegetation Cover in the Eurasian Arctic*, Chapter 5. – 2011. – P. 79-108.

187. Krylov, A. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002-2011 / A. Krylov, J.L. McCarty, P. Potapov, T. Loboda, A. Tyukavina, S. Turubanova, M. Hansen // *Environmental research letter*. – 2014. – Vol.9. – P. 1-8.

188. Kuemmerle, T. Forest cover change and illegal logging in the Ukrainian Carpathians in the transition period from 1988 to 2007 / T. Kuemmerle, O. Chaskovsky, J. Knorn, V.C. Radeloff, I. Kruhlov, W.S. Keeton, P. Hostert // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – Vol. 113. – P. 1194-1207.

189. 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.

190. Lawes, R.A. Monitoring an invasive perennial at the landscape scale with remote sensing / R.A. Lawes, J.F. Wallace // *Ecological Management & Restoration*. – 2008. – №9. – P.53-59.

191. Leblon, B. Photo-interpretation and remote sensing at the Faculty of Forestry and Environmental Management, UNB / B. Leblon, A. Merzouki, D.A. MacLean, A. LaRocque // *Forest. Chronicle*. – 2008. – Vol. 84, №4. – P. 534-538.

192. Lewis, L.S. Increasing carbon storage in intact African tropical forests / S.L. Lewis, G. Lopez-Gonzalez, B. Sonké, K. Affum-Baffoe, T.R. Baker, L.O. Ojo // *Nature*. – 2009. – № 457 (7232). – P. 1003-1006.

193. Longa, H. Socio-economic driving forces of land-use change in Kunshan, the Yangtze River Delta economic area of China / H. Longa, G. Tang, X. Lia, G.K. Heilig // *Journal of Environmental Management*. – 2007. – Vol. 83. – P. 351-364.
194. Loboda, T. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data / T. Loboda, K.J. O'Neal, I. Csizar // *Remote Sensing of the Environment*. – 2007. – Vol. 109(4). – P. 429-442.
195. 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.
196. Main-Knorn, M. Monitoring coniferous forest biomass change using a Landsat trajectory-based approach / M. Main-Knorn, W.B. Cohen, R.E. Kennedy, W. Grodzki, D. Pflugmacher, P. Griffiths, P. Hostert // *Remote Sensing of Environment*. – 2013. – Vol. 139. – P. 277-290.
197. Makela, H. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data / H. Makela, A. Pekkarinen // *Forest Ecology and Management*. – 2004. – No. 196. – P.245-255.
198. Malczewski, J. A GIS-based approach to multiple criteria group decision making / J. A. Malczewski // *International Journal of Geographical Information Systems*. – 1996. – №10(8). – P. 955-971.
199. Malczewski, J. GIS-based Multicriteria decision analysis: a survey of the literature / J. Malczewski // *International Journal of geographical Information Science*. – 2006. – Vol. 20, №. 7. – P. 703–726.
200. Manandhar, R. Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data using post-classification enhancement / R. Manandhar, I.O.A. Odeh, T. Ancev // *Remote Sensing*. – 2009. – Vol. 1. – P. 330-344.
201. McGarigal, K. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps / K. McGarigal, S. A. Cushman, M. C. Neel, E. Ene // *Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts*. – 2002.

202. McQuarrie, A.D.R. Regression and time series model selection / A.D.R. McQuarrie, C. L. Tsai // World Scientific. – 1998. – 455 p.
203. Meng, Q. Geostatistical Prediction and Mapping for Large Area Forest Inventory Using Remote Sensing Data / Q. Meng // UCGIS (University Consortium for Geographic Information Science) Summer Assembly. – 2006. – 20 p.
204. Mennis, J. Mapping the Results of Geographically Weighted Regression / J. Mennis // The Cartographic Journal. – 2006. – Vol. 43, № 2. – P. 171–179.
205. Mitri, G. Mapping post-fire forest regeneration and vegetation recovery using a combination of very high spatial resolution and hyperspectral satellite imagery / G.H. Mitri, I.Z. Gitas // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2011. – Vol. 48, № 3. – P. 1613-1618.
206. Müller, J. Protected areas shape the spatial distribution of a European lynx population more than 20 years after reintroduction / J. Müller, M. Wölfl, S. Wölfl, D. Müller, T. Horthorn, M. Heurich // Biological Conservation. – 2014. – Vol. 177. – P. 210-217.
207. Murphy, P.C. Improving forest operations planning through high-resolution flow channel and wet-areas mapping / P.C Murphy, J. Ogilvie, M. Castonguay, C. Zhang, F.R. Meng, P.A Arp // Forest Chronicle. – 2008. – Vol. 84, № 4. – P. 568-574.
208. Nelson, M. D. Effects of satellite image spatial aggregation and resolution on estimates of forest land area / M. D. Nelson, R. E. McRoberts, G. R. Holden, M.E. Bauer // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – Vol. 30, № 8. – P. 1913-1940.
209. 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.
210. Ohmann, J.L. Mapping change of older forest with nearest-neighbor imputation and Landsat time-series / J.L. Ohmann, M.J. Gregory, H.M. Roberts, W.B. Cohen, R.E. Kennedy, Z. Yang // Forest Ecology and Management. – 2012. – №272. – P. 13-25.

211. Olsson, H. A method for using Landsat time series for monitoring young plantations in boreal forests / H. Olsson // *International Journal of Remote Sensing*. – 2011. – Vol. 30, № 19. – P. 5117-5131.
212. Ozelkan, E. Spatial interpolation of climatic variables using land surface temperature and modified inverse distance weighting / E. Ozelkan, S. Bagis, E.C. Ozelkan, B.B. Ustundag, M. Yucel, C. Ormeci // *International Journal of Remote Sensing*. – 2015. – №36 (4). – P. 1000-1025.
213. Poon, D. Spatial structure of vegetation at the mer bleue peat bog, Ontario / D.M.I. Poon // Thesis, McGill University. – 2009. – 77 p.
214. Quintano, C. Burn severity mapping from Landsat MESMA fraction images and land surface temperature / C. Quintano, A. Fernandez-Manso, D.A. Roberts // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – Vol. 190. – P. 83–95.
215. Ranjan, K. D. GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping / K.D. Ranjan // *Environmental Geology*. – 2008. – №54. – P. 311-324.
216. Rasi, R. An automated approach for segmenting and classifying a large sample of multi-date Landsat imagery for pan-tropical forest monitoring / R. Rasi, C. Bodart, H.-J. Stibig, H. Eva, R. Beuchle, S. Carboni, D. Simonetti, F. Achard // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – Vol. 115. – P. 3659-3669.
217. Riitters, K. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics / K.H. Riitters, R.V. O'Neill, C.T. Hunsacker, J.D. Wickham, D.H. Yankee, S.P. Timmons // *Landscape Ecology*. – 1995. – №10. – P.23-39.
218. Plungmacher, D. Using Landsat-derived disturbance and recovery history and lidar to map forest biomass dynamics / D. Plungmacher, W. Cohen, R. Kennedy, Z. Yang // *Remote Sensing of Environment*. – 2014. – Vol. 151. – P. 124-137.
219. 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.
220. Roder, A. Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in

the Ayora region (eastern Spain) / A. Roder, J. Hill, B. Duguy, J.A. Alloza, R. Vallejo // *Remote Sensing of Environment*. – 2008. – № 112. – P. 259-273.

221. Rogan, J. Land-Cover Change Monitoring with Classification Trees Using Landsat TM and Ancillary Data / J. Rogan, J. Miller, D. Stow, J. Franklin, L. Levien, C. Fischer // *Photogrammetric engineering and remote sensing*. – 2003. – P. 793-804.

222. Roussel, G. Comparison of two atmospheric correction methods for the classification of spaceborne urban hyperspectral data depending on the spatial resolution/ G. Roussel, C. Weber, X. Briottet, X. Ceamanos // *International Journal of Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 39, № 5. – P. 1593-1614.

223. Sales, M. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: A case study for Rondonia, Brazil / M.H. Sales, C.M. Souza Jr., P.C. Kyriakidis, D.A. Roberts, E. Vidal // *Ecological Modelling*. – 2007. – № 205. – P. 221-230.

224. Seebach, L. M. Comparative analysis of harmonized forest area estimates for European countries / L.M. Seebach, P. Strobl, J.S Miguel-Ayanz, J. Gallego, A. Bastrup-Birk // *Forestry*. – 2011. – Vol. 84, №. 3. – P. 285-299.

225. Senf, C. A Bayesian hierarchical model for estimating spatial and temporal variation in vegetation phenology from Landsat time series / C. Senf, D. Pflugmacher, M. Heurich, T. Krueger // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – Vol. 194. – P. 155–160.

226. Silva, J. Improving specific class mapping from remotely sensed data by cost-sensitive learning / J. Silva, F. Bacao, M. Dieng, G.M. Foody, M. Caetano / *International Journal of Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 38(11). – P. 3294-3316.

227. Shapiro-Miller L. Comparison of fire scars, fire atlases, and satellite data in the northwestern United States / L.B. Shapiro-Miller, E.K. Heyerdahl, P. Morgan // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2007. – № 37. – P. 1933-1943.

228. Sonnenschein, R. Differences in Landsat-based trend analyses in drylands due to the choice of vegetation estimate / R. Sonnenschein,

T. Kuemmerle, T. Udelhoven, M. Stellmes, P. Hostert // Remote Sensing of Environment. – 2011. – Vol. 115, № 6. – P. 406-420.

229. SRTM [Electronic resource]: Shuttle Radar Topography Mission // – 2015. – [//srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp](http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp)

230. Stellmes, M. Mapping syndromes of land change in Spain with remote sensing time series, demographic and climatic data / M. Stellmes, A. Röder, T. Udelhoven, J. Hill // Land Use Policy. – 2013. – № 30. – P. 685-702.

231. Szostak, M. Using of Sentinel-2 images for automation of the forest succession detection/ M. Szostak, P. Hawryło, D. Piela // European journal of remote sensing. – 2017. – Vol. 51, № 1. – P. 142-149.

232. Suzanchi, K. Land use land cover change in National Capital Region of India: a remote sensing & GIS based two decadal spatial-temporal analyses / Ki. Suzanchi, R. Kaur // Procedia Social and Behavioral Sciences. – 2011. – Vol. 21. – P. 212-221.

233. 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.

234. Tanga, J. Multitemporal analysis of forest fragmentation in the upstream region of the Nenjiang River Basin, Northeast China / J. Tanga, K. Bub, J. Yang, S. Zhang, L. Chang // Ecological Indicators. – 2012. – Vol. 23. – P. 597-607.

235. Terekhin, E.A. Measurement of vegetation mantle change in the zone of influence of Stary Oskol-Gubkin Iron Ore Integrated Works / E.A. Terekhin, O.M. Samofalova // Journal of mining science. – 2015. – Vol. 51, №1. – P. 197-202.

236. Ticehurst, C. Using multitemporal digital elevation model data for detecting canopy gaps in tropical forests due to cyclone damage: An initial assessment / C. Ticehurst, S. Phinn, A. Held // Australian ecology. – 2007. – Vol. 32, № 1 – P. 59-69.

237. The 2030 Agenda for Sustainable Development and the Sustainable Development goals. – url: https://ec.europa.eu/environment/sustainable-development/SDGs/index_en.htm 11.03.2019.

238. Townshend, J. Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges / R. J. Townshend,

J.G. Masek, C. Huang, E.F. Vermote, F. Gao, S. Channan et al. // *International Journal of Digital Earth*. – 2012. – Vol. 5, № 5. – P. 373-397.

239. Van Oort, P.A.J. Improving land cover change estimates by accounting for classification errors / P.A.J. Van Oort // *International Journal of Remote Sensing*. – 2005. – № 26. – P. 3009-3024.

240. Van Oort, P.A.J. Do users ignore spatial data quality? A Decision-Theoretic Perspective / P.A.J. Van Oort, A.K. Bregt // *Risk Analysis: An International Journal*. – 2005. – Vol. 25. – P. 1599-1610.

241. Volcani, A. The use of remote sensing and GIS for spatio-temporal analysis of the physiological state of a semi-arid forest with respect to drought years / A. Volcani, A. Karnieli, T. Svoray // *Forest Ecology and Management*. – 2005. – Vol. 215, № 1-3. – P. 239-250.

242. Wainwright, J. Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity / J. Wainwright, M. Mulligan // 2nd Edition, UK. – 2013. – 494 p.

243. Walton, J. Difficulties with estimating city-wide urban forest cover change from national, remotely-sensed tree canopy maps / J.T. Walton // *Urban Ecosystems*. – 2008. – Vol. 11, № 1. – P. 81-90.

244. Warren, M.A. Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Imager over coastal and inland waters / M.A. Warren, S.G.H. Simis, V. Martinez-Vicente, K. Poser, M. Bresciani, K. Alikas et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2018. – Vol. 225. – P. 267-289.

245. Watson, P.K. Business & Economics / P.K. Watson, S.S. Teelucksingh // University of the West Indies Press. – 2002.

246. Weihand, R. Object-based classifications pixel-based classification: comparative importance of multi-resolution imagery / R.C. Weihand, N.D. Riggan // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2006. – Vol. XXXVIII-4/C7.

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

248. Wulder, M. Towards automated segmentation of forest inventory polygons on high spatial resolution satellite imagery / M.A. Wulder, J. White, H. Geoffrey, C. Guillermo // *Forest Chronicle*. – 2008. – Vol. 84, № 2. – P. 221-230.

249. Xiao, J. Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing / J. Xiao, Y. Shen, J. Ge,

R. Tateishi, C. Tang, Y. Liang, Z/ Huang // Landscape and Urban Planning. – 2006. – Vol. 75. – P. 69-80.

250. Xie, Y. Remote sensing imagery in vegetation mapping: A review / Y. Xie, Z. Sha, M. Yu // Journal of Plant Ecology. – 2008. – Vol. 1, №1. – P. 9-23.

251. Yang, J. Landsat remote sensing approaches for monitoring long-term tree cover dynamics in semi-arid woodlands: Comparison of vegetation indices and spectral mixture analysis / J. Yang, P.J. Weisberg, N.A. Bristow // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 119. – P. 62-71.

252. Yin, H. Mapping agricultural land abandonment from spatial and temporal segmentation of Landsat time series / H. Yin, A.V. Prishchepov, T. Kuemmerle, B. Bleyhl, J. Buchner, V.C. Radeloff // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 210. – P. 12-24.

253. Yu, L. Spatial-temporal Patterns of Land-use Change in Typical Transect Area Along China National Highway 106 During 1996-2008 / L. Yu, L. Yansui, G. Liying, L. Shasha // Journal of Northeast Agricultural University. – 2011. – Vol. 18, № 3. – P.39-46.

254. Yu, X. Multi-temporal remote sensing of land cover change and urban sprawling the coastal city of Yantai, China / X. Yu, A. Zhang, X. Hou, M. Li, Y. Xia // International Journal of Digital Earth. – 2012. – Vol. 6, № 2. – P. 137-154.

255. Zhang, Y. Multi-resolution integration of land cover for sub-pixel estimation of urban impervious surface and forest cover / Y. Zhang, B. Guindon // International Journal of Digital Earth. – 2009. – Vol. 2, № 2. – P. 89-108.

256. Zhu, S. Comparison of Sampling Designs for Estimating Deforestation from Landsat TM and MODIS Imagery: A Case Study in Mato Grosso, Brazil / S. Zhu, H. Zhang, R. Liu, Y. Cao, G. Zhang // The Scientific World Journal. – 2014. – 10 p.

257. Zoran, M.A. Forest changes assessment using satellite remote sensing imagery / M.A. Zoran, L.V. Zoran // 8 Conference on Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology. – Stockholm. – 2005. – P. 13-15.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации базы данных
№ 2012620071

**База данных CSFM_2.0 объектов наземного покрова
на территорию Республики Марий Эл на основе
спутниковых снимков Landsat**

Правообладатель(ли): **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Марийский государственный технический
университет» (RU)**

Автор(ы): **Курбанов Эльдар Аликрамович,
Воробьев Олег Николаевич, Губаев Александр Владимирович,
Лежнин Сергей Анатольевич, Полевищикова Юлия Александровна,
Александрова Татьяна Леонидовна, Незамаев Сергей
Александрович, Валиуллина Рамиля Рафилъевна (RU)**

Заявка № **2011620881**
Дата поступления **23 ноября 2011 г.**
Зарегистрировано в Реестре баз данных
18 января 2012 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности
Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2015620067

База данных *CSFM&RS-3.0* ГИС тестовых участков для мониторинга и оценки точности наземного покрова при тематическом картировании территории Республик Марий Эл и Чувашия на основе спутниковых данных

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный технологический университет» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

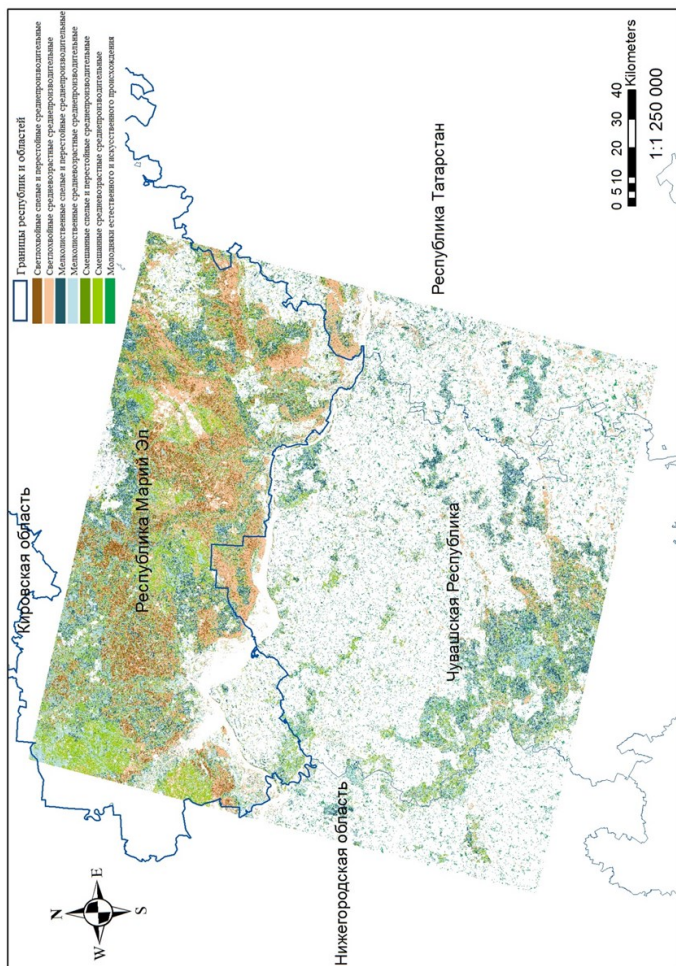
Заявка № 2014621593

Дата поступления 19 ноября 2014 г.

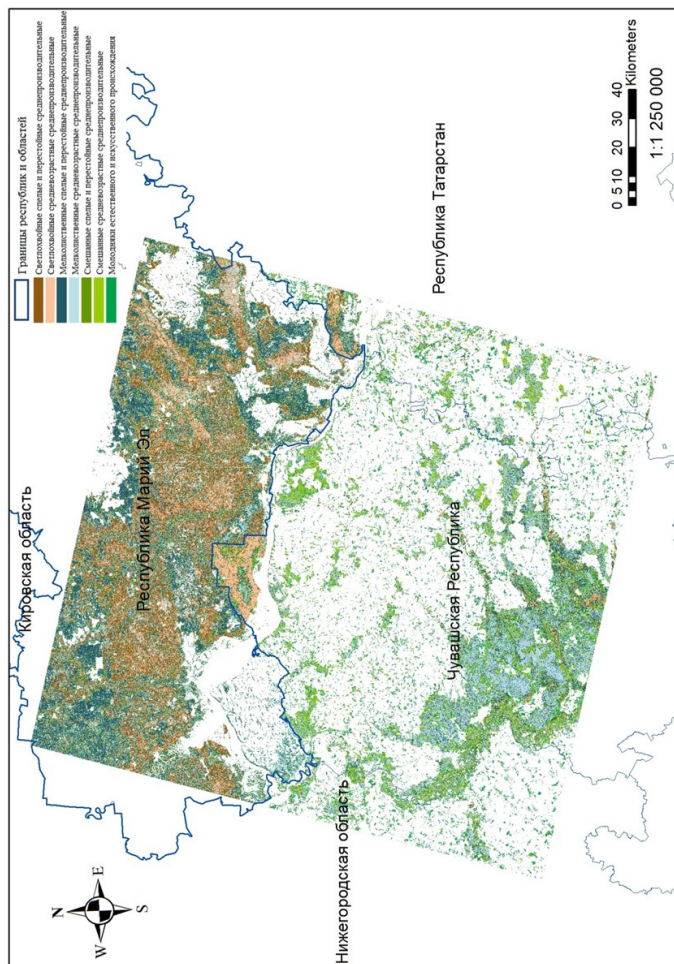
Дата государственной регистрации
в Реестре баз данных 14 января 2015 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

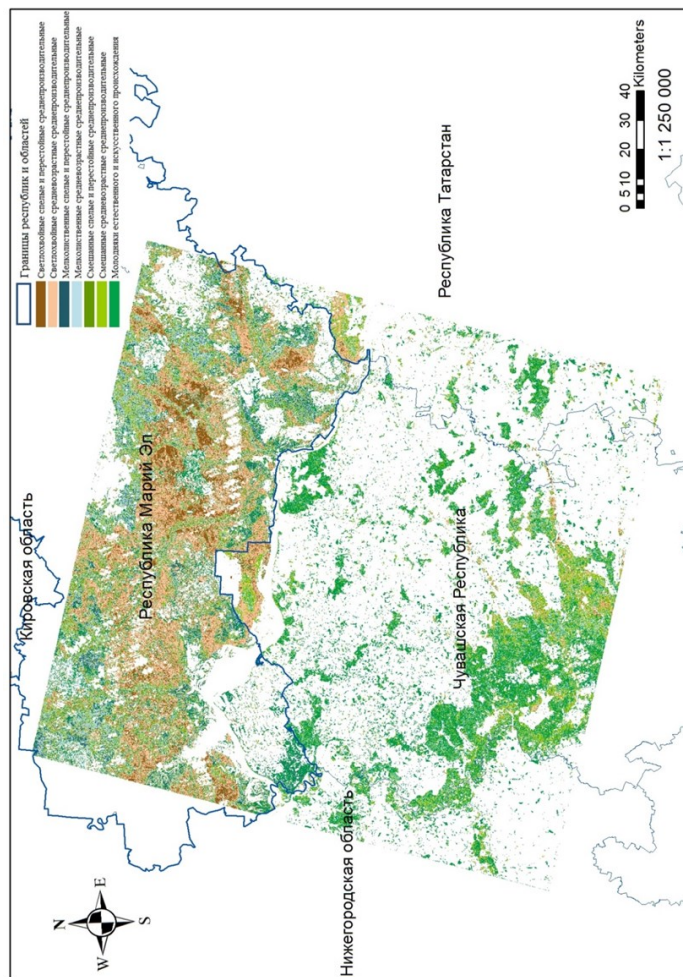
Л.Л. Кирий



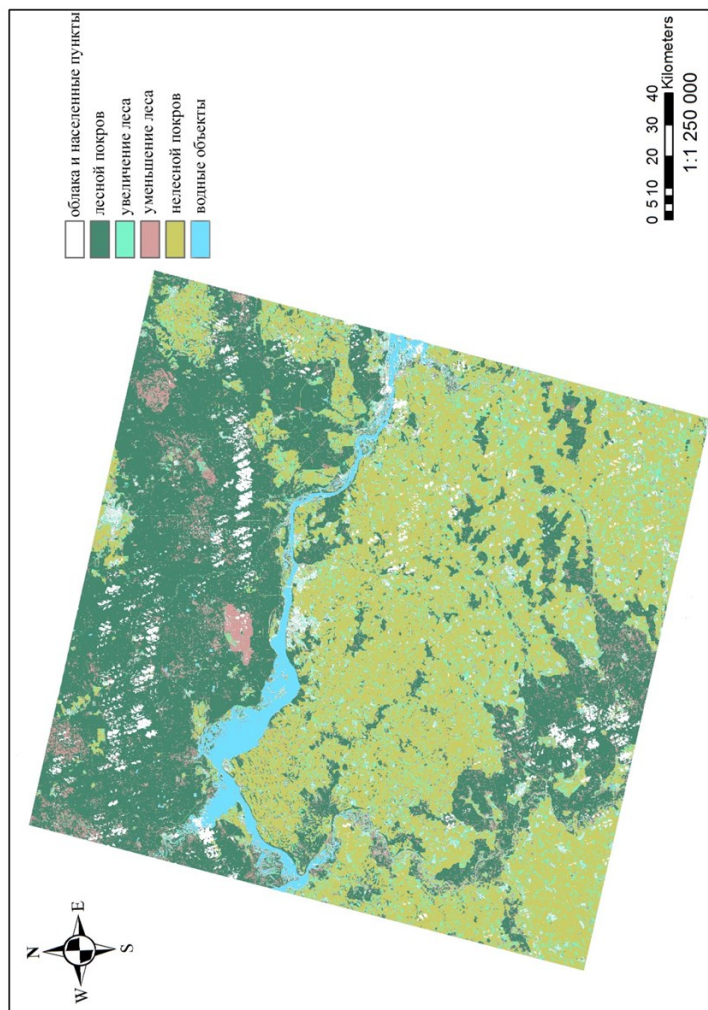
Тематическая карта Landsat 1985



Тематическая карта Landsat 2001

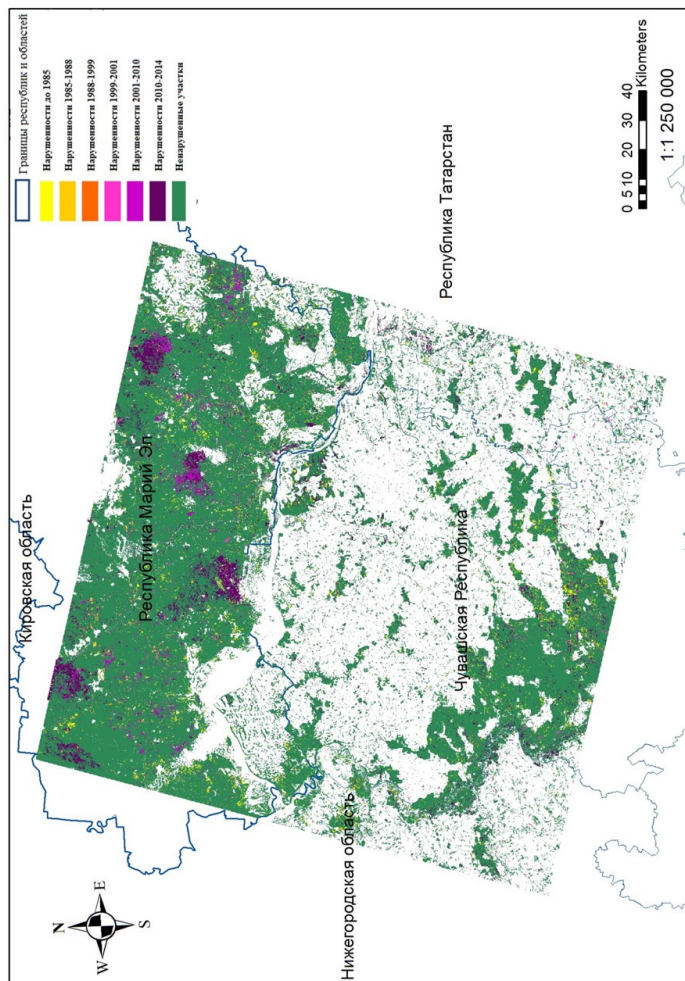


Тематическая карта Landsat 2014

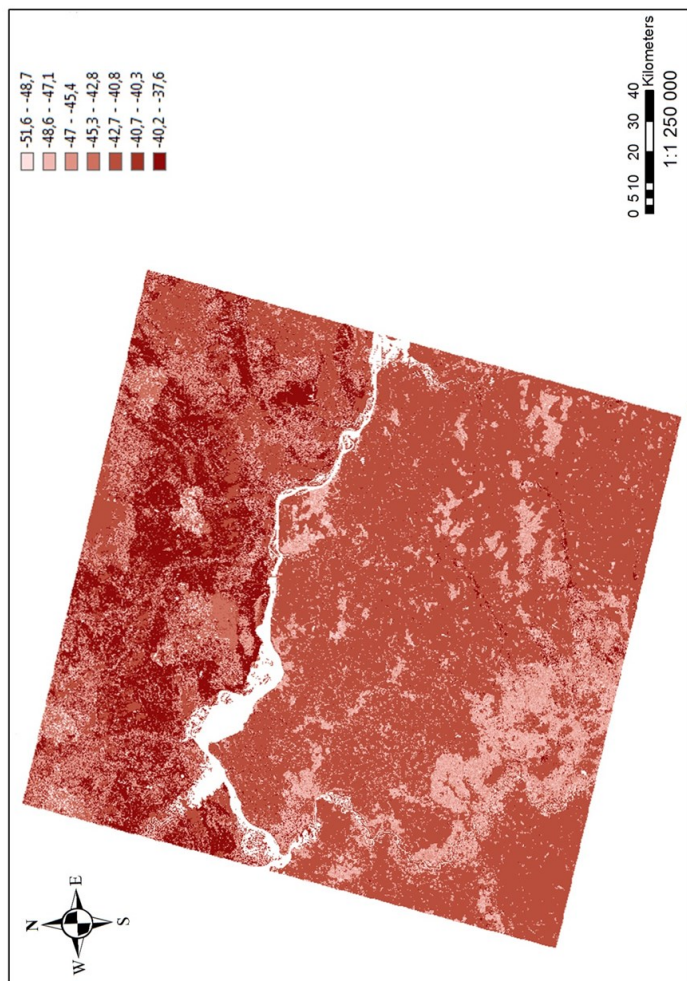


Тематическая карта пространственной динамики растительного покрова за 1985-2014 гг.

Приложение 7



Тематическая карта нарушения лесного покрова за 1985-2014 гг.



Интегрированная карта динамики нарушения лесного покрова

Научное издание

Воробьев Олег Николаевич
Курбанов Эльдар Аликрамович
Полевщикова Юлия Александровна
Лежнин Сергей Анатольевич

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ
ДИНАМИКИ ЛЕСНОГО ПОКРОВА
В СРЕДНЕМ ПОВОЛЖЬЕ
ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Монография

Под общей редакцией проф. Э. А. Курбанова

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

Подписано в печать 27.03.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 11,62.
Тираж 200 экз. Заказ № 4407.

Поволжский государственный технологический университет
424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «Вертола»
Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Льва Толстого, 45

ISBN 978-5-8158-2118-7



9 785815 821187 >