

ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА:
БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ

Международный сборник научных статей

FOREST ECOSYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGE:
BIOLOGICAL PRODUCTIVITY AND REMOTE MONITORING

International Compendium of research papers

ISSN 2500-4263

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ЦЕНТР УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ И ДИСТАНЦИОННОГО
МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ

ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА:

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ

Международный сборник научных статей

FOREST ECOSYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGE:

BIOLOGICAL PRODUCTIVITY AND REMOTE MONITORING

International Compendium of research papers

Йошкар-Ола
2019

Редакционная коллегия:

Э. А. Курбанов, д-р. с.-х. наук, профессор, Поволжский государственный технологический университет (отв. редактор)

С. А. Барталев, д-р техн. наук, профессор, Институт космических исследований РАН

С. И. Чумаченко, д-р биол. наук, профессор, Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана

В. К. Хлюстов, д-р с.-х. наук, профессор, Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева

О. Н. Воробьев, канд. с.-х. наук, доцент, Поволжский государственный технологический университет

Э. А. Терехин, канд. геогр. наук, доцент, Белгородский государственный университет

Д-р Иоаннис Гитас, профессор, лаборатория лесоуправления и дистанционного зондирования, Университет Аристотеля (г. Салоники, Греция)

Д-р Ша Цзиньмин, профессор, директор Китайско-Европейского центра управления окружающей средой и ландшафтом

Д-р Абрахам Томас, менеджер в области дистанционного зондирования, Совет по науке о Земле

Д-р Цзиньян Ванг, профессор, колледж туризма и географических наук, Юньнаньский педагогический университет

Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: международный сборник научных статей / отв. ред. проф. Э.А. Курбанов. – Текст: электронный.– Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019. – 151 с. – URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>

Основу сборника составили материалы международной научной конференции «Лесные экосистемы в условиях изменения климата: региональные и международные аспекты», цель которой – обмен научным и практическим опытом между учеными, преподавателями, научными сотрудниками вузов и научных организаций и объединение усилий для развития перспективных направлений науки в области лесного хозяйства и экологии.

УДК 630
ББК 43:20.18

Editorial board:

E.A. Kurbanov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Volga State University of Technology

S.A. Bartalyov, Doctor of Engineering Science, Professor, Space Research Institute of Russian Academy of Sciences

S.I. Chumachenko, Doctor of Biological Sciences, Professor, Mytishchi Branch, Bauman Moscow State Technical University

V.K. Khlyustov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy

O.N. Vorobiev, Ph.D., Associate Professor, Volga State University of Technology

E.A. Terekhin, Ph. D, Associate Professor, Belgorod State University

Dr. Ioannis Gitas, Professor, Laboratory of Forest Management and Remote Sensing of the Aristotle University of Thessaloniki

Dr. Sha Jinming, Director China-Europe Center for Environment and Landscape Management, College of Geography, Fujian Normal University

Dr. Abraham Thomas, Competency Manager of Remote Sensing, Council for Geoscience

Dr. Jinliang Wang, Professor, College of Tourism & Geographic Sciences, Yunnan Normal University

Forest ecosystems under climate change: biological productivity and remote monitoring :

F 75 compendium of research papers / Executive editor Prof. E.A. Kurbanov. – Text: electronic. – Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2019. – 151 p. – URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>

The purpose of the International Compendium of Research Papers "**Forest ecosystems under climate change: biological productivity and remote monitoring**" is the exchange of expertise between research staff of universities and R&D organizations .

UDC 630
BBK 43:20.18

ISSN 2500-4263

© Volga State University
of Technology, 2019
© Center of Sustainable forest management
and Remote sensing , 2019

ACKNOWLEDGEMENT

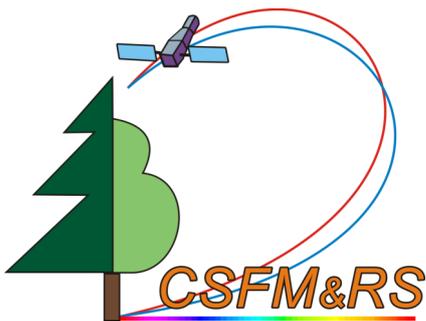
The Jean Monnet Center of Excellence “European Expertise and Technology for Environmental Protection and Sustainable Forestry (SUFEX)” and project «GIS and Remote Sensing for Sustainable Forestry and Ecology (SUFOGIS)» at Volga State University of Technology has been funded with support from the EU ERASMUS+ 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.

Центр совершенства Жана Монне «Европейская экспертиза и технологии в области защиты окружающей среды и устойчивого лесоводства (SUFEX)» и проект «Геоинформационные системы и дистанционное зондирование Земли для устойчивого лесопользования и экологии (SUFOGIS)» в Поволжском государственном технологическом университете получили финансовую поддержку Европейского Союза.

Содержание сборника 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.

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



СБОРНИК «ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА»: РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО ДЕСЯТИЛЕТИЯ

В. С. Шалаев

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(Мытищинский филиал)

Цель международного сборника научных статей «Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг» – обмен научным опытом между преподавателями, научными сотрудниками вузов и научных организаций и объединение усилий для развития перспективных направлений науки Российской Федерации путем публикаций статей о последних достижениях, имеющих перспективу дальнейшего практического применения. В данной статье отмечается актуальность научной направленности сборника, его соответствие Стратегии Международного союза лесных исследовательских организаций (ИЮФРО) на 2015-2019 гг. «Связывая леса, науку и людей», которая определила пять научных направлений-тем в наиболее значимых областях: Леса для людей; Леса и изменения климата; Леса и лесная продукция для «зеленого» будущего; Биоразнообразие, экосистемные услуги и биоинвазия; Взаимодействие лесов, почвы и воды. Со времени выхода первого сборника «Лесные экосистемы в условиях изменения климата» (а это было в 2010 году) здесь опубликовано более 150 статей. Около 200 авторов не только из Российской Федерации, но и из других стран представили здесь результаты своих исследований. Обоснованы следующие выводы: направление «Лесные экосистемы в условиях изменения климата», публикация сборников трудов которого была начата в Марийском государственном техническом университете (ныне Поволжский государственный технологический университет) еще в 2010 году, носит весьма актуальный и перспективный характер не только для российского, но и для международного научного сообщества; в разработку этого направления в нашей стране вовлечено достаточно большое число организаций и учреждений; только в издании сборника приняли участие около двухсот ученых из более тридцати различных организаций и учреждений нашей страны; налицо положительная динамика публикационной результативности вовлеченных в издание сборника авторов; подтверждаются актуальность и востребованность этого научного направления в российском научном лесном сообществе; подчеркивается уникальность регулярности издания сборника.

Ключевые слова: *лесные экосистемы, изменение климата, лесное сообщество, публикационная результативность, периодическое издание, сборник научных статей.*

“FOREST ECOSYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGE”: FIRST DECADE RESULTS

V. S. Shalaev

Bauman Moscow State Technical University (Mytishchy Branch)

The aim of the International collection of research papers “Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring” is to exchange scientific experience among teachers, university scholars, research institute scientists and to join the efforts of all the stakeholders to develop the promising areas of science of the Russian Federation by publishing articles on the recent achievements with a prospect of further application. The paper emphasizes scientific relevance of the International collection, its compliance with the Strategy of the International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) for 2015-2019 “Interconnection Forests, Science and People”. The Strategy identifies five research themes in the most significant areas: Forests for People; Forests and Climate Change; Forests and Forest-based Products for a Greener Future; Biodiversity, Ecosystem Services and Biological Invasions; Forests, Soil and Water Inter-

actions. Since the first Collection “Forest Ecosystems under Climate Change”. Initiated by Volgatech in 2010, the issues of the Collections included over 150 articles by about 200 Russian and foreign authors. The publication of the International collection of research papers “Forest Ecosystems under Climate Change” proved to be relevant and promising for both, national and international research community. Quite a number of organizations and institutions have been involved in the development of this area in our country. Over two hundred scientists from more than thirty different organizations and institutions of our country contributed to the collection. The research proved relevant and highly demanded by the Russian research community interested in the forestry issues.

Keywords: *forest ecosystems, climate change, forest community, publication performance.*

Введение

Уважаемый читатель, перед Вами очередной сборник научных статей под названием «Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг», традиционно издаваемый Поволжским государственным технологическим университетом (ранее Марийский государственный технический университет). Первый из них был выпущен еще в 2010 году (Лесные..., 2010), а в настоящее время он уже приобрел статус международного.

Цель настоящего международного сборника научных статей «Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг», как, впрочем, и предшествующих изданий – обмен научным опытом между преподавателями, научными сотрудниками вузов и научных организаций и объединение усилий для развития перспективных направлений науки Российской Федерации путем публикаций статей о последних достижениях в данной области, имеющих перспективу дальнейшего практического применения (Лесные..., 2019).

Необходимо отметить актуальность научной направленности сборника, подчеркнуть его соответствие стратегии Международного союза лесных исследовательских организаций (ИЮФРО), стратегии международного научного лесного сообщества. Международный союз лесных исследовательских организаций объединяет в настоящее время более 15 тысяч ученых из более чем 600 организаций 126 стран мира. Деятельность Союза отражает весь спектр мировых «лесных» исследований. Тематика деятельности ИЮФРО не имеет аналогов и включает 9 отделений, более 50 исследовательских, 180 рабочих и 10 междисциплинарных целевых групп. Кроме того, ИЮФРО предлагает специальные программы, проекты и инициативы для поддержки более информированного принятия решений и укрепления исследовательского потенциала (Материалы сайта ИЮФРО, 2019; Johann et al., 1892-2017). w.iufro.org/publications/general-publications.

На XXIV Всемирном конгрессе ИЮФРО, состоявшемся в 2014 году в г. Солт-Лейк-Сити (США), была принята Стратегия этой организации на 2015-2019 гг. «Связывая леса, науку и людей», которая определила пять научных направлений-тем в наиболее значимых областях. Ниже приведены темы, формирующие направления международного лесного научного сотрудничества на указанный период:

- Леса для людей;
- **Леса и изменения климата;**
- Леса и лесная продукция для «зеленого» будущего;
- Биоразнообразие, экосистемные услуги и биоинвазия;
- Взаимодействие лесов, почвы и воды.

Таким образом, направленность настоящего сборника «Лесные экосистемы в условиях изменения климата» строго соответствует одному из пяти научных направлений Стратегии ИЮФРО, стратегии международного научного лесного сообщества. При этом в указанной

Стратегии сформулированы задачи, обоснование и сферы особого внимания рассматриваемого направления (Тепляков и др., 2015; IUFRO 2015-2019 Strategy).

Итак, на новом научном уровне сформулирована сложная проблема взаимодействия климата, лесов, воды, урожая и социума, потенциальных путей ее решения в условиях экспоненциального роста народонаселения, сокращения ресурсной базы и ухудшения экологической обстановки в мире (Tikina, Kurbanov, 2012; Loboda et al., 2012).

Научная программа только что завершившегося в Бразилии (г. Куритиба) XXV Всемирного конгресса ИЮФРО объединила ученых всех возрастов со всего мира по всему спектру лесных дисциплин, которые занимаются исследованиями, образованием и применением наукоемких знаний для решения возникающих проблем и отвечают меняющимся потребностям нашего все более глобализованного общества. Научная программа была организована по пяти, соответствующим Стратегии ИЮФРО 2014-2019 гг., тематическим направлениям, указанным выше (Материалы сайта XXV Всемирного конгресса ИЮФРО, 2019), в том числе в направлении «Леса и изменения климата». Все вышесказанное подтверждает актуальность научной направленности рассматриваемого сборника.

Методика оценки публикационной результативности авторов

Необходимо отметить, что со времени выхода в 2010 году первого сборника «Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг» было опубликовано более 150 статей около 200 авторов не только из Российской Федерации, но и из других стран. Отечественные исследователи были представлены вузами, отраслевыми и академическими НИИ, рядом других организаций, общим числом, превышающим три десятка (Лесные..., 2019).

Была сделана выборка всех задействованных авторов по всем уже изданным сборникам и, в первую очередь, ученых и исследователей российских учреждений и организаций. Среди них в разные годы было от 23 до 100 авторов, которые представлены в соответствующих публикациях. При этом многие авторы не публиковались регулярно и в ряде случаев не могли отражать общую картину и оценку направленности рассматриваемого сборника.

Для дальнейшего анализа и оценки было принято решение выбрать наиболее часто и регулярно публиковавшихся авторов, своего рода «завсегдатаев», давних и постоянных друзей нашего издания, активность которых в значительной степени отражает направленность сборника «Лесные экосистемы в условиях изменения климата». В этом случае были выбраны 26 отечественных ученых–авторов, которые были наиболее активны в рассматриваемом направлении и достаточно регулярно публиковали результаты своих исследований в сборниках «Лесные экосистемы в условиях изменения климата».

При этом, используя научную электронную библиотеку (НЭБ) e-LIBRARY.RU, возможно оценить публикационную результативность каждого автора, в том числе, в динамике за ряд лет. Это позволяет в конечном итоге оценить не только выбранных авторов, а, суммируя, их показатели, и научное направление «Лесные экосистемы в условиях изменения климата» для российских реалий в целом.

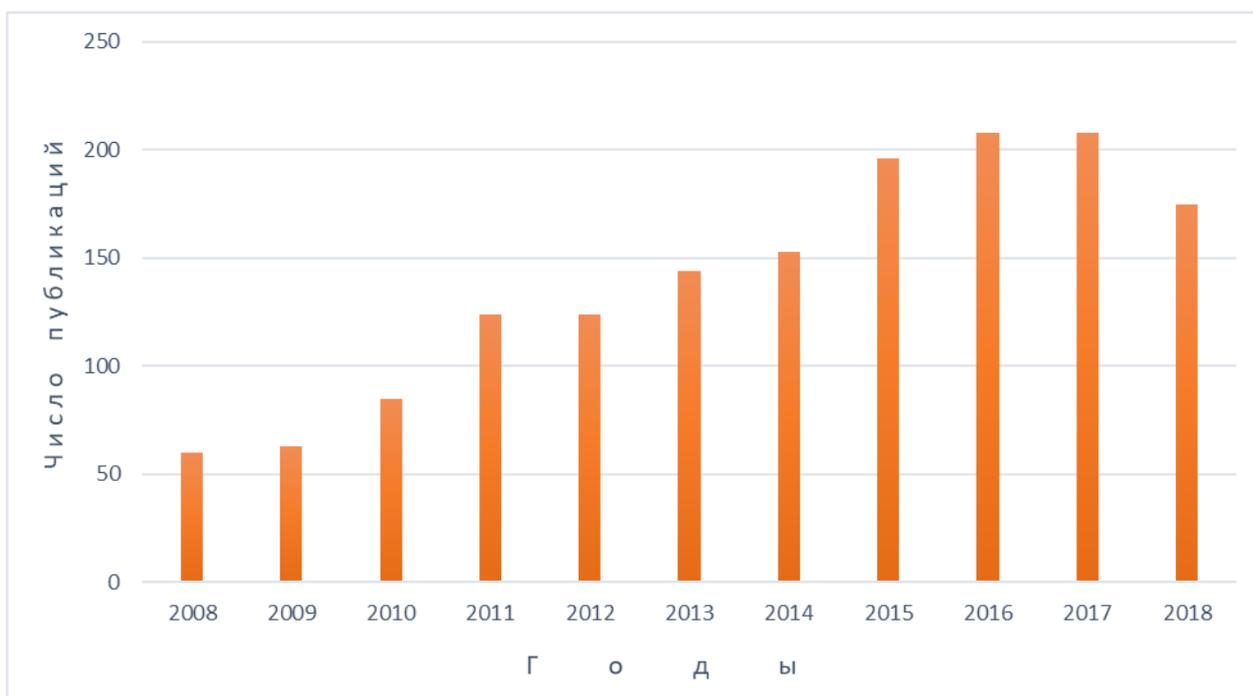
Анализ и некоторые результаты исследования

Проведя анализ публикационной результативности 26 отечественных ученых–авторов, проявивших наибольшую активность и участие в рассматриваемых сборниках, возможно привести суммарные показатели числа их публикаций в соответствии с данными Научной электронной библиотеки (НЭБ) e-LIBRARY.RU (на середину октября 2019 года) в динамике с 2008 по 2018 гг. (см. таблицу). Графически эта динамика показана на рисунке.

**Публикационная результативность авторов, наиболее активных и публикуемых в сборниках
«Лесные экосистемы в условиях изменения климата»
(на середину октября 2019 года)**

Общее число публикаций в соответствии с данными РИНЦ по годам										
2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
60	63	85	124	124	144	153	196	208	208	175

Необходимо отметить несколько иную динамику публикационной результативности для организаций и учреждений лесного комплекса¹, а сопоставление их (Шалаев и др., 2019, Шалаев и др., 2018) говорит о большей активности ученых, вовлеченных в публикацию вышеупомянутых сборников и освещение различных аспектов научного направления «Лесные экосистемы в условиях изменения климата» (Курбанов, Воробьев, 2014).



**Общее число публикаций авторов, наиболее активных и публикуемых в сборниках
«Лесные экосистемы в условиях изменения климата»**

Выводы

1. Направление «Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг», публикация сборников трудов которого была начата в Марийском государственном техническом университете (в настоящее время Поволжский государственный технологический университет) еще в 2010 году, носит весьма актуальный и перспективный характер не только для российского, но и для международного научного сообщества.

2. В разработку этого направления в нашей стране вовлечено достаточно большое число организаций и учреждений. Только в издании публикаций сборника приняли участие около двухсот ученых из более тридцати различных организаций и учреждений России.

3. Выявленная положительная динамика публикационной результативности вовлеченных в издание сборника авторов подтверждает не только их большую по сравнению с отраслевой активность, но и актуальность и востребованность этого научного направления в российском научном лесном сообществе.

¹ Более подробно о публикационной результативности научно-исследовательских работ в интересах лесного комплекса России можно ознакомиться в статье В. С. Шалаева и др., размещенной в Лесном журнале № 6 за 2019 год (с. 270-279).

4. Регулярность издания, выход его в течение 10 лет, подчеркивают его уникальность: это едва ли не единственный случай в системе высших учебных заведений лесной направленности, когда столь длительный период ученые Поволжского государственного технологического университета во главе с профессором Э.А. Курбановым удерживают уровень, направленность и актуальность научного направления. При этом издание обеспечивается финансово, несмотря на явно недостаточный уровень финансирования лесной науки в стране (Стратегия..., 2018; Шалаев и др., 2018; Шалаев и др., 2019).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 37.8809.2017/8.9.

Библиографический список

1. 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.
2. Лесные экосистемы в условиях изменения климата [Электронный ресурс]. Йошкар-Ола: Центр устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов, 2019. – URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>. – 14.10.2019.
3. Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: материалы международной конференции с элементами научной школы для молодежи [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2010. – 275с. – URL: https://inter.volgatech.net/upload/documents/files_publications_conf2010.pdf. – 14.10.2019.
4. Материалы сайта ИЮФРО [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iufro.org/publications/general-publications>"w.iufro.org/w.iufro.org/publications/general-publications". – 14.10.2019.
5. Материалы сайта XXV Всемирного конгресса ИЮФРО [Электронный ресурс]. – URL: <http://iufro2019.com>. – 14.10.2019.
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.elibrary.ru> – 14.10.2019.
7. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 сентября 2018 года № 1989-р. – 102 с. [Электронный ресурс]. – URL: <http://static.government.ru/media/files/cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdIxID77KCTL.pdf>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус.
8. Тепляков, В.К. История съездов ИЮФРО и Россия: монография: в 2-х т. Т.2 / В.К. Тепляков, В.С. Шалаев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2015. – 372 с.
9. Шалаев, В.С. О результативности научно-исследовательских работ в лесном комплексе / В.С. Шалаев, С.Н. Рыкунин // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IV научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 2019. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – С. 34-37.
10. Шалаев, В.С. Публикационная активность как индикатор результативности НИР. Анализ и перспективы / В.С. Шалаев В.С., С.Н. Рыкунин, Г.Н. Федотов // Лесной вестник. – 2018. – Вып. 5 (22). – С.129-136.
11. IUFRO 2015-2019 STRATEGY. Interconnecting forests, science and people. – 18 p. Available at: http://www.iufro.org/download/file/18532/3635/iufro-strategy-2015-2019_pdf/. – 14.10.2019.
12. Johann, E. 125 Years of IUFRO. History of the International Union of Forest Research Organizations 1892-2017 / E. Johann, A. Buck, B. Burger, M. Kleine, R. Pruller, G. Wolfrum. – Vienna. Printed in Austria by Eigner Druck, 128p.
13. Loboda, T. Understanding Origins and Impacts of Drought / T.V. Loboda, O.N. Krankina, E.A. Kurbanov // Eos, Transactions American Geophysical Union. – 2012. – Vol. 93(42). – P. 417.
14. Tikina, A.V. Extreme weather events and long-term forestry obligations: is reliance on forest certification possible? [Electronic resource] / A.V. Tikina, E.A. Kurbanov //Impacts of extreme weather on natural, socio-economic and land-use systems: focus on the 2010 summer anomaly in the Volga region: Proceedings of the NASA Science Meeting, GOF-C-GOLD and NEESPI Workshop and Regional Conference. – Yoshkar-Ola: VolgaTech, 2012. – R. 145-148. – <http://csfm.marstu.net/publications.html>. – 11.08.2017

References

1. Kurbanov E.A., Vorobiev O.N. Lesovodstvo. Mezhdunarodnoe lesnoe khozyaistvo [Forestry. International forestry]: uchebnoe posobie. Rekomendovano UMO po obrazovaniyu v oblasti lesnogo dela, Ioshkar-Ola: PGTU, 2014, 254 p.
2. Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata [Forest ecosystems under climate change] [Elektronnyi resurs], Ioshkar-Ola: Tsentr ustoichivogo upravleniya i distantsionnogo monitoringa lesov, 2019, URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>. – 14.10.2019.

3. Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost', monitoring i adaptatsionnye tekhnologii [Forest ecosystems under climate change: biological productivity, monitoring, and adaptation technologies]: materialy mezhdunarodnoi konferentsii s elementami nauchnoi shkoly dlya molodezhi [Elektronnyi resurs], Ioshkar-Ola: Mariiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010, 275 p. - URL: https://inter.volgatech.net/upload/documents/files_publications_conf2010.pdf. – 14.10.2019.
4. Materialy saita IYuFRO [IUFRO website materials] [Elektronnyi resurs], URL: <https://www.iufro.org/publications/general-publications>. – 14.10.2019.
5. Materialy saita XXV Vsemirnogo kongressa IYuFRO [Materials of the site of the XXV World Congress of IUFRO] [Elektronnyi resurs], URL: <http://iufro2019.com>. – 14.10.2019.
6. Nauchnaya elektronnyaya biblioteka eLIBRARY.RU [Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU] [Elektronnyi resurs], - URL: <http://www.elibrary.ru> – 14.10.2019.
7. Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda [The development strategy of the forest complex of the Russian Federation until 2030], Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 20 sentyabrya 2018 goda № 1989-r, 102 p., URL: <http://static.government.ru/media/files/cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdIxID77KCTL.pdf>, svobodnyi.
8. Teplyakov V.K., Shalaev V.S. Istoriya s"ezdov IYuFRO i Rossiya [The history of the congresses of the IHUFRO and Russia]: monografiya, v 2-kh t., T.2, 2-e izd., ispr. i dop., Moscow: FGBOU VPO MGUL, 2015, 372 p.
9. Shalaev V.S., Rykunin S.N. O rezul'tativnosti nauchno-issledovatel'skikh rabot v lesnom komplekse [On the effectiveness of research in the forest complex] // Materialy IV nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, SPb.: POLITEKH-PRESS, 2019, P. 34-37.
10. Shalaev V.S., Rykunin S.N., Fedotov G.N. Publikatsionnaya aktivnost' kak indikator rezul'tativnosti NIR. Analiz i perspektivy [Publication activity as an indicator of the effectiveness of research. Analysis and Prospects.], *Lesnoi vestnik [Forest Gazette]*, 2018, Vyp. 5 (22), P.129-136.
11. IUFRO 2015-2019 STRATEGY, Interconnecting forests, science and people, 18 p., Available at: http://www.iufro.org/download/file/18532/3635/iufro-strategy-2015-2019_pdf/. – 14.10.2019.
12. Johann E., Buck A., Burger B., Kleine M., Pruller R., Wolfrum G. 125 Years of IUFRO. History of the International Union of Forest Research Organizations 1892-2017, Vienna, 128 p.
13. Loboda T., Krankina O.N., Kurbanov E.A. Understanding Origins and Impacts of Drought, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2012, Vol. 93(42), 417 p.
14. Tikina A.V., Kurbanov E.A. Extreme weather events and long-term forestry obligations: is reliance on forest certification possible? [Electronic resource], *Impacts of extreme weather on natural, socio-economic and land-use systems: focus on the 2010 summer anomaly in the Volga region: Proceedings of the NASA Science Meeting, GOF-C-GOLD and NEESPI Workshop and Regional Conference*, Yoshkar-Ola: VolgaTech, 2012, pp. 145- 148. – <http://csfm.marstu.net/publications.html>. – 11.08.2017.

ДИНАМИКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОРОДА ЙОШКАР-ОЛЫ

Е. А. Гончаров, Н. А. Булыгина, Н. А. Кухтенко
Поволжский государственный технологический университет

В статье представлены итоги обработки результатов наблюдений за климатическими показателями для территории города Йошкар-Олы за период 1936-2018 гг. В качестве периодов взяты «скользящие» 30-летние периоды относительно периода 1961-1990 гг., принятого Всемирной метеорологической организацией в качестве базового для расчета «климатологических норм». Для различных временных периодов определены среднегодовые температуры воздуха, количество атмосферных осадков, рассчитаны агроклиматические показатели: суммы активных температур, даты устойчивого перехода среднесуточных температур через 0 и +10 °С, продолжительность теплых периодов. Впервые для региона определены климатические и агроклиматические нормы для периода 1981-2010 гг., с использованием линейного тренд-анализа оценены скорости изменения климатических показателей. Установлено, что климатические показатели г. Йошкар-Олы за период 1936-2018 гг. имеют тенденции к росту и соответствуют таковым для Европейской части России. Наиболее интенсивный рост наблюдается с конца 80-х годов XX века. Так, скорости роста среднегодовой температуры за рассматриваемый период составили 0,27 °С/10 лет, суммы активных температур – 40,6 °С/10 лет, продолжительности теплого периода (со среднесуточными температурами более 0 °С) – 2 дня/10 лет. Положительный рост годового количества осадков начинается с периода 1971-2000 гг., достигая максимальных значений в отдельные периоды (28 мм/10 лет). При анализе изменений климатических показателей необходимо учитывать расположение метеостанции относительно крупных населенных пунктов (источников тепла), а также изменения приборной и методической базы наблюдений.

Ключевые слова: климатические изменения, город, температура воздуха, атмосферные осадки, сумма активных температур, тренд.

DYNAMICS OF CLIMATE INDICATORS IN YOSHKAR-OLA

E. A. Goncharov, N. A. Bulygina, N. A. Kukhtenko
Volga State University of Technology

The article presents the analysis of observation of climate indicators on the territory of Yoshkar-Ola over the period from 1936 to 2018. The time span was divided into rolling 30-year periods with regard to the period from 1961 to 1990, adopted by the World Meteorological Organization as the reference time-frame for calculating climatological norms. The values of average annual air temperatures and precipitation have been determined for different time periods. Moreover, agro-climatic indicators including cumulative temperatures, dates of a stable increase in the average daily temperatures over the freezing point and over +10 °C, and duration of warm periods have also been considered. Climate and agro-climate normal values for the period between 1981 and 2010 in the region have been determined for the first time. Therefore, the authors carried out a linear trend analysis and assessed the dynamics of climatic indicators. It has been revealed that the climatic indicators in Yoshkar-Ola over the period between 1936 and 2018 tend to increase, which is in line with those observed on the European territory of Russia. The most intensive growth has been recorded since the late 1980-s. Thus, the growth rate of the average annual temperature for the period under review was 0.27 °C/10 years; the growth rate of cumulative temperatures was 40.6 °C/10 years; an increase in the warm period duration (with average daily temperatures over the freezing point) 2 days/10 years. The increase in annual precipitation began in 1971-2000, reaching its maximum values of 28 mm/10 years. When analyzing the changes in climatic indicators, it is necessary to take into account the location of the weather station relative to major built-up areas, as well as equipment upgrade and methodology changes.

Keywords: *climate change, city, air temperature, precipitation, cumulative temperatures, trend*

Актуальность

Изменение климата является одной из важнейших международных проблем XXI века, которая выходит за рамки научных дискуссий и представляет собой комплексную междисциплинарную область знаний, охватывающую экологические, экономические и социальные аспекты устойчивого развития. Изменения климата многообразны и проявляются, в частности, в изменении уровня Мирового океана, площадей распространения ледников и вечной мерзлоты, режима стока рек, усилении неравномерности выпадения осадков, изменении частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений (Frich et al., 2002; Qian, 2017; Loboda et al., 2012; IPCC, 2018). Ожидаемые изменения климата неизбежно отразятся на жизни людей, на состоянии животного и растительного мира во всех регионах планеты, а в некоторых из них станут ощутимой угрозой для благополучия населения и устойчивого развития (Климатическая доктрина ..., 2009; FAO, 2018). С изменением климата возрастает и необходимость в получении достоверной информации об изменении климатических показателей на глобальном, национальном, региональном и субрегиональном уровнях, ее анализе, для выработки мероприятий, рекомендаций и оценке рисков для природной среды и социально-экономической сферы.

Комплексными показателями состояния климата являются многолетние режимы основных климатических показателей: температуры воздуха и количества атмосферных осадков, которые существенно отражаются на биоте и всех аспектах человеческой деятельности. Для их исследования необходимо иметь большие временные ряды параметров атмосферы на различных ее уровнях, и в этом случае наиболее приемлемой информацией для прогноза метеоэлементов на длительные сроки являются климатические показатели температуры воздуха и осадков, полученные путем обработки множества данных за определенный период времени и изучения их внутренней структуры.

Целью данного исследования является анализ временной структуры температурного режима и атмосферных осадков на территории города Йошкар-Олы и его окрестностей на примере данных за период с 1936 по 2018 годы, и получение сравнительных оценок в изменении климатических показателей за различные временные интервалы.

При этом ставились следующие **задачи**: выявить открытые источники метеоданных, создать временную базу данных метеопараметров для г. Йошкар-Олы, выполнить анализ динамики метеопараметров.

Объектом исследования является температурный режим и атмосферные осадки на территории г. Йошкар-Олы в приземном слое атмосферы. **Предмет** исследования – сравнительная оценка изменений климатических показателей температурного режима и осадков, полученных с использованием временных рядов рассматриваемого периода.

Материалы и методика исследований

Источниками исходных данных послужили открытые базы метеоданных National Centers for Environmental Information (NCEI), Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) и климатические справочники (Агроклиматические ресурсы..., 1972; Научно-прикладной справочник..., 1992).

При выполнении работы применялись статистические методы обработки метеорологических данных, сравнительный и картографический методы. Для оценки временной изменчивости исследуемых рядов использованы линейные тренды с применением регрессионного анализа. Для этого методом наименьших квадратов рассчитывались коэффициенты уравнения линейной регрессии вида (Пановский, Брайер, 1972):

$$y(\tau) = b\tau + c_0, \quad (1)$$

где $y(\tau)$ – сглаженное значение метеопараметра на момент времени τ (годы), b – угловой коэффициент (скорость тренда), c_0 – свободный член, равный сглаженному значению метеопараметра на момент $\tau = 0$ (начало периода).

Расчет сумм активных температур и дат перехода температур через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ осуществлялся в соответствии с методическими указаниями (Методические указания..., 2010). Сумма активных температур за период со средней суточной температурой свыше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ определялась как сумма температур воздуха за все дни соответствующего периода: от даты устойчивого перехода температуры через $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ весной до даты перехода температуры через $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ осенью. При этом за дату устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ весной принимался первый день периода, сумма положительных отклонений которого (от соответствующего предела) превышает сумму отрицательных отклонений любого из последующих периодов с отрицательными отклонениями. За дату устойчивого перехода температуры воздуха через $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ осенью принимался первый день того периода, сумма отрицательных отклонений которого превышает сумму положительных отклонений любого из последующих периодов с такими отклонениями.

Общая характеристика климата г. Йошкар-Олы

Территория города Йошкар-Олы и его окрестностей относится к умеренному климатическому поясу. Тип климата – умеренно континентальный, климатическая область – Атлантико-континентальная европейская лесная. Климат характеризуется тёплым летом, морозной зимой с устойчивым снежным покровом и хорошо выраженными переходными сезонами: весной и осенью.

Наиболее важными климатообразующими факторами являются: солнечная радиация (широта местности города Йошкар-Олы – $56,5^{\circ}$ с.ш.), положение в глубине континента, циркуляция атмосферы и характер подстилающей поверхности (в первую очередь рельеф местности (перепады абсолютных высот от 80 до 125 м над уровнем моря), характер растительности и застройки).

Над территорией города преобладают воздушные массы умеренных широт. Зимой (как и в целом за год) преобладают южные и юго-западные ветры; летом – западные, а также ветры с северной составляющей (рис. 1).

Среднегодовая повторяемость направлений Повторяемость направлений ветра в январе Повторяемость направлений ветра в июле

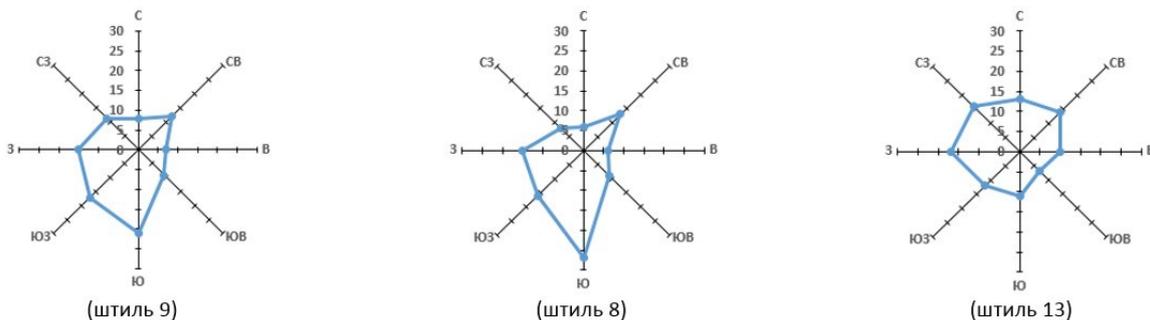


Рис. 1. Роза ветров по метеостанции г. Йошкар-Олы

Нередко имеет место вторжение с севера арктических масс воздуха, обуславливающих значительное понижение температуры. При этом весной и осенью возникают опасные для сельскохозяйственных растений заморозки. Сравнительно реже, обычно с проходящими циклонами, в республику поступает морской воздух, сформировавшийся над Атлантикой, вызывающий дождливую прохладную погоду летом; зимой в таких случаях наступает потепле-

ние, сопровождающееся иногда оттепелями. В отдельные годы значительное влияние на условия погоды летом оказывают теплые воздушные массы континентального происхождения, поступающие с юга и юго-востока. Этот воздух характеризуется высокими температурами и значительной сухостью, что обуславливает весной и летом наступление жаркой и сухой погоды (Энциклопедия Марий Эл, 2009).

По условиям влагообеспеченности территория относится к зоне достаточного увлажнения вегетационного периода при засухах в отдельные годы (гидротермический коэффициент Селянинова составляет 1,1-1,3; вероятность засух менее 25). По агроклиматическому районированию территория принадлежит умеренному агроклиматическому поясу (Агроклиматические ресурсы..., 1972).

Результаты исследования

Анализ динамики температур воздуха и осадков выполнен на основе данных метеостанции 27485 Йошкар-Олы из открытых ресурсов NCEI и ВНИИГМИ-МЦД.

Важнейшей составляющей для понимания современного глобального климата является исследование региональных изменений температуры воздуха. На рис. 2 представлен многолетний ход средней годовой температуры воздуха.

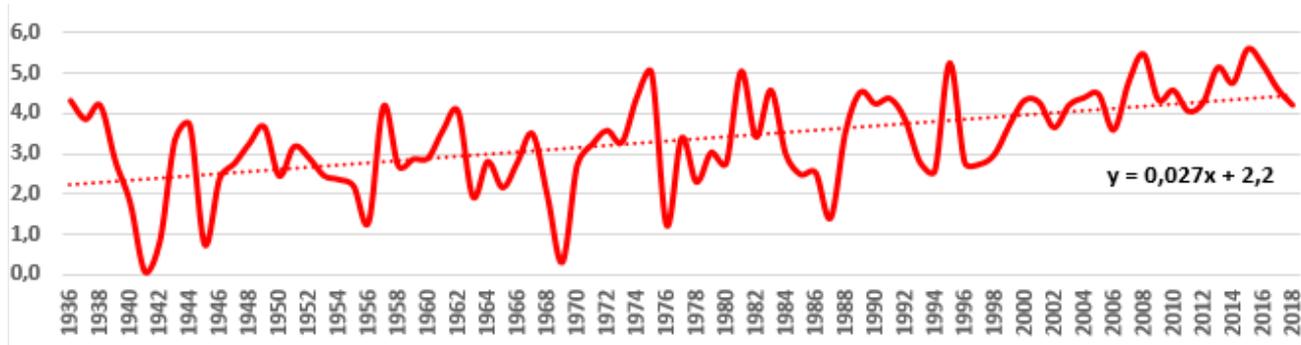


Рис. 2. Динамика среднегодовой температуры воздуха в г. Йошкар-Оле

Для характеристики интенсивности изменений средних температур воздуха и сопоставления с данными других исследователей (Курбанов, 2002; Kurbanov, Post, 2002; Мустафина, 2017; Доклад об особенностях климата..., 2018) с использованием линейного тренд-анализа (Пановский, Брайер, 1972; Доклад об особенностях климата..., 2018) были рассчитаны коэффициенты линейного тренда, b (°C/10 лет) для различных периодов (табл. 1). В качестве периодов взяты «скользящие» 30-летние периоды относительно периода 1961-1990 гг., принятого Всемирной метеорологической организацией в качестве базового для расчета «климатологических норм» (WMO Guidelines on the Calculation..., 2017; Qian, 2017).

В период с 1936 по 2018 гг. произошло повышение среднегодовой температуры на 1,5°C по средним значениям сравниваемых периодов и на 2,2°C по уравнению линии тренда. По тридцатилетним периодам скорость роста температуры (b , °C/10 лет) становится устойчиво положительной с периода 1941-1970 гг. и наиболее интенсивно начинает нарастать с периода 1981-2010 гг. В целом скорость роста температуры за весь рассматриваемый период составил 0,27 °C/10 лет. При этом следует отметить, что площадка метеостанции несколько раз была перемещена (в 1941, 1952 и 2009 гг.) и фактически находится в городской черте, также за рассматриваемый период в связи с ростом города (численность населения за рассматриваемый период возросла в 10 раз: с 27 тыс. чел. в 1939 г. до 270 тыс. чел. в 2018 г.) существенно увеличилось его тепловое воздействие на прилегающую территорию.

Оценки линейного тренда среднегодовой температуры приземного воздуха и годовой суммы осадков

Параметры уравнения, показатели	Временной период							
	1936-1960	1941-1970	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2018	1976-2018
Среднегодовая температура приземного воздуха								
b, °C/10 лет	-0,08	0,14	0,12	0,26	0,07	0,40	0,61	0,52
c ₀ , °C	2,8	2,3	2,6	2,7	3,3	3,2	3,3	2,7
Средняя годовая температура за период, °C	2,7	2,5	2,8	3,1	3,4	3,8	4,2	3,8
% от нормы 1961-1990	87	82	92	100	110	123	135	124
Годовая сумма осадков								
b, мм/10 лет	27	18	27	34	0	3	28	0
c ₀ , мм	428	451	473	478	543	544	524	570
Средняя годовая сумма осадков за период, мм	463	479	515	531	543	549	564	569
% от нормы 1961-1990	87	90	97	100	102	103	106	107

Скорость роста среднегодовой температуры за период 1976-2018 гг. по данным метеостанции г. Йошкар-Олы соответствует скорости роста температуры для Европейской части России и составляет 0,52 °C/10 лет, что в 2,5 раза больше скорости роста глобальной температуры за тот же период: 0,17-0,18 °C/10 лет, и более чем в 1,5 раза больше средней скорости потепления приземного воздуха над сушей Земного шара: 0,28-0,29 °C/10 лет (Доклад об особенностях климата..., 2018).

При анализе данных динамики осадков (рис. 3 и табл. 1) необходимо учитывать, что за период 1936-1965 гг. в базах приведены прямые данные наблюдений, а в 1966 г. – данные наблюдений с учетом поправок на смачивание (Богданова и др., 2002).

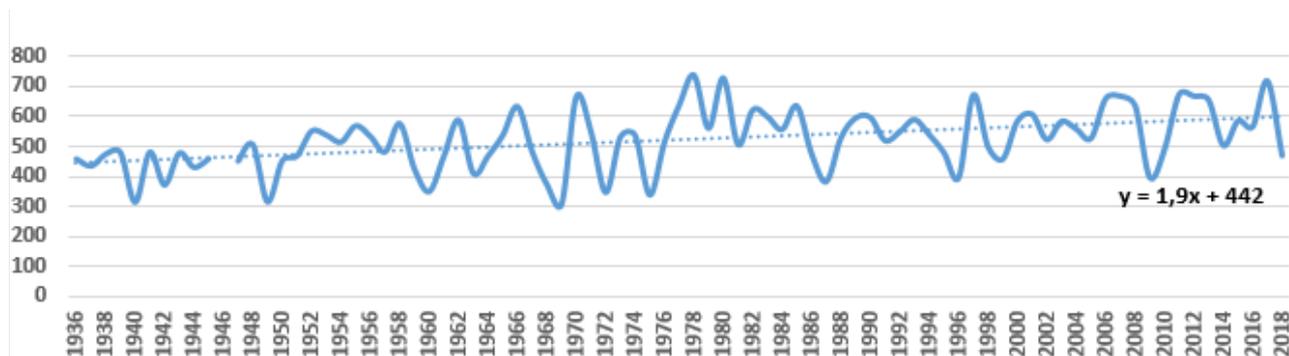


Рис. 3. Динамика годовой суммы осадков в г. Йошкар-Оле

Этим могут быть частично объяснены более низкие значения до 1966 г., начиная с периода 1971-2000 гг. отмечается медленный рост количества осадков, однако внутри периодов из-за существенных различий отдельных лет скорость роста (коэффициент b) меняется от 0 до 28 мм/10 лет, что соответствует данным для Европейской части России за период 1976-2018 гг. (Доклад об особенностях климата..., 2018).

Одним из важных агрометеорологических показателей для сельского и лесного хозяйства является сумма активных температур воздуха. При этом под суммой активных температур

понимается показатель, пропорциональный количеству тепла и выражающийся суммой средних суточных температур воздуха, превышающих биологический минимум температуры, установленный для определенного периода развития растения (ГОСТ 17713..., 1989). На рис. 4 приведена динамика сумм активных температур по данным метеостанции г. Йошкар-Олы.

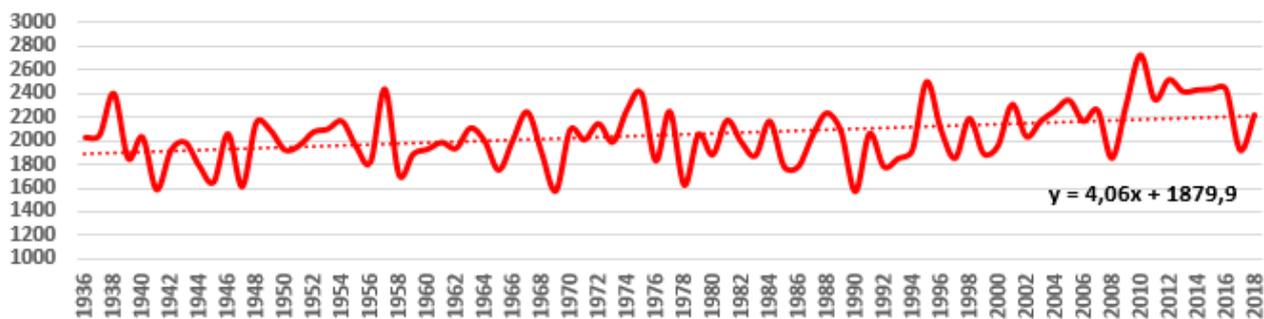


Рис. 4. Динамика суммы активных температур воздуха в г. Йошкар-Оле

Для характеристики интенсивности изменений сумм активных температур воздуха и сопоставления с данными других исследователей (Наумов, Ахмедова, 2016) с использованием линейного тренд-анализа (Пановский, Брайер, 1972; Доклад об особенностях климата..., 2018) были рассчитаны коэффициенты линейного тренда, b ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) для различных периодов (табл. 2).

Таблица 2

Оценки линейного тренда суммы активных температур воздуха

Параметры уравнения, показатель	Временной период							
	1936-1960	1941-1970	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2018	1976-2018
b , $^{\circ}\text{C}/10$ лет	4,6	38,4	-0,7	-16,5	-30,4	123,3	159,4	115,8
c_0 , $^{\circ}\text{C}$	1962	1889	2005	2018	2056	1883	1956	1852
Средняя сумма активных температур за период, $^{\circ}\text{C}$	1968	1948	2004	1993	2009	2074	2187	2107
% от нормы 1961-1990	99	98	101	100	101	104	110	106

В период с 1936 по 2018 гг. произошло повышение годовых значений суммы активных температур на 219°C по средним значениям сравниваемых периодов и на 333°C по уравнению линии тренда. По тридцатилетним периодам скорость роста температуры (b , $^{\circ}\text{C}/10$ лет) имеет положительные значения в период с 1936 по 1970 гг., затем наступает период снижения, устойчиво положительной скоростью роста становится с периода 1981-2010 гг. В целом скорость роста суммы активных температур за весь рассматриваемый период составила $40,6^{\circ}\text{C}/10$ лет. Скорость роста суммы активных температур за период 1976-2018 гг. по данным метеостанции г. Йошкар-Олы составляет $115,8^{\circ}\text{C}/10$ лет и соответствует скорости роста температуры для Европейской части России (Доклад об особенностях климата..., 2018).

С точки зрения развития фаз культурных и лесных растений представляет динамика дат и продолжительности теплого и холодного периодов. В табл. 3 приведены данные о датах устойчивого перехода через температуры 0°C и $+10^{\circ}\text{C}$, продолжительности теплого периода, рассчитанные в соответствии с (Методические указания..., 2010).

На рис. 5 представлены графики, отражающие динамику дат устойчивого перехода температуры воздуха через значение 0°C , обозначающие наступление климатической весны и зимы, и дат устойчивого перехода температуры воздуха через значение $+10^{\circ}\text{C}$, обозначающие период активной вегетации по данным метеостанции г. Йошкар-Олы в период 1936-2018 гг.

Динамика дат устойчивого перехода и продолжительности теплых периодов

Показатель	Временной период						
	1936-1960	1941-1970	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2018
Дата весеннего устойчивого перехода среднесуточной температуры через 0 °С / отклонение от периода 1961-1990 гг. (дни)	07.04 +4	07.04 +4	04.04 +1	03.04	01.04 -2	01.04 -2	31.03 -4
Дата весеннего устойчивого перехода среднесуточной температуры через +10 °С / отклонение от периода 1961-1990 гг. (дни)	14.05 +6	12.05 +4	08.05 0	08.05	07.05 -1	07.05 -1	04.05 -4
Дата осеннего устойчивого перехода среднесуточной температуры через +10 °С / отклонение от периода 1961-1990 гг. (дни)	16.09 -4	17.09 -3	18.09 -2	20.09	19.09 -1	21.09 +1	22.09 +2
Дата осеннего устойчивого перехода среднесуточной температуры через 0 °С / отклонение от периода 1961-1990 гг. (дни)	31.10 +1	31.10 +1	30.10 0	30.10	30.10 0	04.11 +5	06.11 +7
Продолжительность периода со среднесуточными температурами > +10 °С / отклонение от периода 1961-1990 гг. (дни)	125 -10	128 -7	133 -2	135	135 0	137 +2	141 +6
Продолжительность периода со среднесуточными температурами > 0 °С / отклонение от периода 1961-1990 гг. (дни)	207 -3	207 -3	209 -1	210	212 +2	217 +7	219 +9

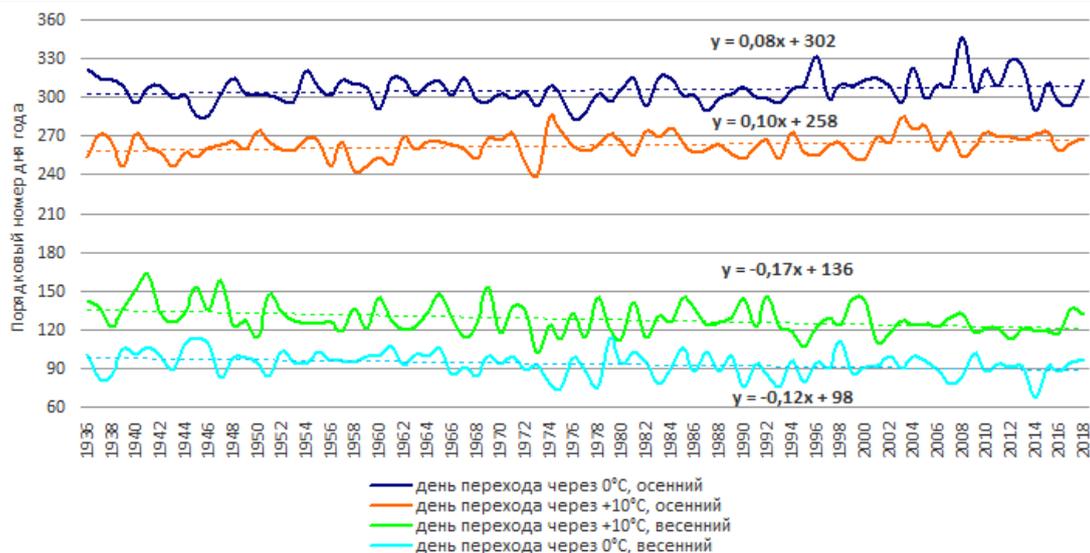


Рис. 5. Динамика дат устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха

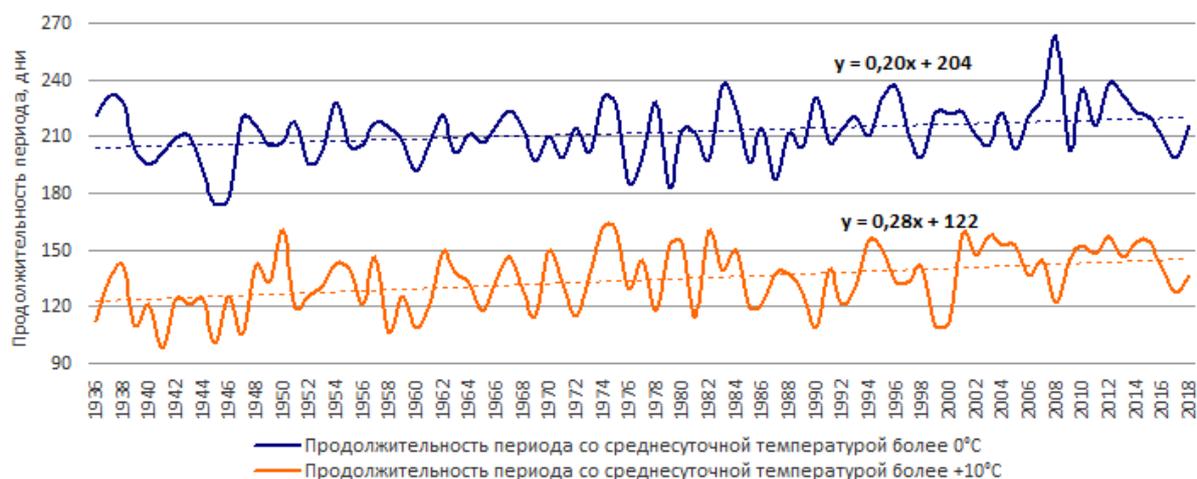


Рис. 6. Продолжительность теплых периодов

Данные табл. 3 и рис. 5 и 6 также показывают тенденции смещения весенних дат на более ранние, а осенних – на более поздние сроки. В целом скорость увеличения теплого периода (со среднесуточными температурами более 0 °С) за период 1936-2018 гг. составила 2 дня/10 лет. Наиболее интенсивный рост наблюдается с конца 80-х годов XX века.

Выводы

Таким образом, в ходе выполненной работы для различных временных периодов (1936-1960, 1941-1970, 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 и 1991-2018 гг.) определены значения среднегодовых температур воздуха, суммы атмосферных осадков, рассчитаны агроклиматические показатели: суммы активных температур, даты устойчивого перехода среднесуточных температур через 0 °С и +10 °С, продолжительность теплых периодов для территории г. Йошкар-Олы.

Впервые для региона оценены климатические и агроклиматические нормы для периода 1981-2010 гг., с использованием линейного тренд-анализа оценены скорости изменения климатических показателей.

Установлено, что климатические показатели г. Йошкар-Олы за период 1936-2018 гг. имеют тенденции к росту и соответствуют таковым для Европейской части России (Наумов, Ахмедова, 2016; Мустафина, 2017; Доклад об особенностях климата..., 2018).

Так, скорость роста температуры за рассматриваемый период составила 0,27 °С/10 лет. По тридцатилетним периодам скорость роста температуры становится положительной с периода 1941-1970 гг. и наиболее интенсивно начинает нарастать с периода 1981-2010 гг. Начиная с периода 1971-2000 гг. отмечается медленный рост количества осадков, однако внутри периодов из-за существенных различий отдельных лет скорость роста меняется от 0 до 28 мм/10 лет.

Скорость роста суммы активных температур за весь рассматриваемый период составила 40,6 °С/10 лет, причем скорость роста температуры имеет положительные значения в период с 1936 по 1970 гг. и с 1981 по настоящее время. Даты устойчивого перехода среднесуточных температур через 0 °С и +10 °С сдвигаются весной на более ранние сроки, а осенью – на более поздние. В целом скорость увеличения теплого периода (со среднесуточными температурами более 0 °С) за период 1936-2018 гг. составила 2 дня/10 лет. Наиболее интенсивный рост наблюдается с конца 80-х годов XX века.

При анализе изменений климатических показателей необходимо также учитывать расположение метеостанции относительно крупных населенных пунктов и антропогенных источников тепла, а также изменение приборной и методической базы наблюдений. Так, площадка метеостанции г. Йошкар-Олы с момента создания несколько раз была перемещена и в настоящее время фактически находится в городской черте, при этом за рассматриваемый период произошел значительный рост города (численность населения за рассматриваемый период возросла в 10 раз), что существенно увеличило тепловое воздействие на прилегающую территорию.

Библиографический список

1. Агроклиматические ресурсы Марийской АССР. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. – 107 с.
2. Богданова, Э.Г. Новая модель корректировки измеренных осадков и её применение в полярных районах РФ / Э.Г. Богданова, В.С. Голубев, Б.М. Ильин, И.В. Драгомилова // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 10. – С. 68-93.
3. ГОСТ 17713-89. Сельскохозяйственная метеорология. Термины и определения. – Введ. 1990-01-01. – Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 15 с.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – Москва, 2019. – 79 с.

5. Климатическая доктрина Российской Федерации. Утв. распоряжением Президента Российской Федерации от 17 декабря 2009 г. № 861-рп. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94992/. – 10.11.2019.
6. Курбанов Э.А. Бюджет углерода основных экосистем Волго-Вятского района. – Йошкар-Ола, 2002. – 300 с.
7. Методические указания по составлению агрометеорологического ежегодника для сельскохозяйственной зоны Российской Федерации. РД 52.33.725-2010. – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». – 2010. – 146 с.
8. Мустафина, А.Б. Изменения основных климатических показателей на территории Республики Татарстан за период 1966–2013 гг. / А.Б. Мустафина // Географический вестник = Geographical bulletin. – 2017. – №2(41). С. 99–108.
9. Наумов, В.А. Изменение продолжительности периода вегетации и суммы активных температур в Калининградской области за последние десять лет / В.А. Наумов, Н.Р. Ахмедова // Известия КГТУ. – №42. – 2016. – С. 175-184.
10. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 29. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. – 582 с.
11. Пановский, Г.А. Статистические методы в метеорологии / Г.А. Пановский, Г.В. Брайер. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 210 с.
12. Специализированные массивы Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meteo.ru/data> – 05.03.2019.
13. Энциклопедия Марий Эл. – Йошкар-Ола, 2009. – 872 с.
14. FAO. The State of the World's Forests 2018 - Forest pathways to sustainable development. – Rome, 2018. – 118 p.
15. Frich, P. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century / P. Frich, L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A. M. G. Klein Tank, T. Peterson // Climate Research. 2002. – Vol. 19. – P. 193-212.
16. IPCC. International Panel on Climate Change. Special report: Global Warming of 1.50C [Electronic resource]. – 2018. – URL: <http://www.ipcc.ch>
17. Kurbanov, E.A. Changes in area and carbon in forests of the Middle Zavolgie: a regional case study of Russian forests/ E.A. Kurbanov, W.M. Post // Climatic change. – 2002. – Vol. 55, № 1-2. – P. 157-171.
18. Loboda, T. A Joint NASA GOF-C-GOLD and NEESPI workshop to examine the natural, socio-economic, and land use impacts of the 2010 drought in European Russia / T.V. Loboda, O.N. Krankina, E.A. Kurbanov //The Earth observer. – 2012. – V. 24(5). – P. 36-40.
19. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia/ T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne // Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991. Eds. G. Gutman, R. Volker. – Springer International Publishing, 2017. – P. 173-192.
20. Qian, W. Temporal climatology and anomalous weather analysis / W. Qian. – Springer, 2017. – 687 p.
21. National Centers for Environmental Information [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/> – 10.05.2019.
22. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO-No. 1203. World Meteorological Organization, 2017 [Electronic resource]. – URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166. – 10.11.2019.

References

1. Agroklimaticheskie resursy Mariiskoi ASSR [Agroclimatic resources of the Mari ASSR], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972, 107 p.
2. Bogdanova E.G., Golubev V.S., Il'in B.M., Dragomilova I.V. Novaya model' korrektyrovki izmerennykh osadkov i ee primeneniye v polyarnykh raionakh RF [A new model for adjusting measured precipitation and its application in the polar regions of the Russian Federation], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2002, No. 10, pp. 68-93.
3. GOST 17713-89. Sel'skokhozyaistvennaya meteorologiya. Terminy i opredeleniya [Agricultural meteorology. Terms and Definitions], Moscow, 1989, 15 p.
4. Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2018 god [2018 climate report on the territory of the Russian Federation], *Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy (Rosgidromet)* [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet)], Moscow, 2019, 79 p.
5. Klimaticheskaya doktrina Rossiiskoi Federatsii [Climate Doctrine of the Russian Federation], available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94992/, 10.11.2019.
6. Kurbanov E.A. Byudzhety ugleroda osnovnykh ekosistem Volgo-Vyatskogo raiona [The carbon budget of pine ecosystems of the Volga-Vyatka region], IYoshkar-Ola, 2002, 300 p.
7. Metodicheskie ukazaniya po sostavleniyu agrometeorologicheskogo ezhegodnika dlya zemledel'cheskoi zony Rossiiskoi Federatsii [Guidelines for the compilation of an agrometeorological yearbook for the agricultural zone of the Russian Federation], RD 52.33.725-2010, Obninsk: GU "VNIIGMI-MTsD", 2010, 146 p.
8. Mustafina A.B. Izmeneniya osnovnykh klimaticheskikh pokazatelei na territorii Respubliki Tatarstan za period 1966–2013 gg. [Changes of the main climatic indicators in the territory of the Republic of Tatarstan during 1966–2013], *Geograficheskii vestnik* [Geographical bulletin], 2017, No. 2(41), pp. 99-108.

9. Naumov V.A., Akhmedova N.R. Izmenenie prodolzhitel'nosti perioda vegetatsii i summy aktivnykh temperatur v Kaliningradskoi oblasti za poslednie desyat' let [Changes in the growing season duration and the sum of active temperatures in the Kaliningrad region over the past decade], *Nauchnyi zhurnal "Izvestiya KGTU"* [News of KSTU], No. 42, 2016, pp. 175-184.
10. Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Vypusk 29 [Scientific-applied reference on the climate of the USSR. Issue 29], St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 582 p.
11. Panovskii G.A., Braier G.V. Statisticheskie metody v meteorologii [Statistical Methods in Meteorology], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972, 210 p.
12. Spetsializirovannye massivy Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrometeorologicheskoi informatsii – Mirovogo tsentra dannykh (VNIIGMI-MTsD) [Specialized arrays of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center (RIHMI-WDC)], available at: <http://meteo.ru/data>, 05.03.2019.
13. Entsiklopediya Marii El [Encyclopedia of Marii El], Yoshkar-Ola, 2009, 872 p.
14. FAO. The State of the World's Forests 2018 – Forest pathways to sustainable development, Rome, 2018, 118 p.
15. Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A. M. G., Peterson T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century, *Climate Research*, 2002, Vol. 19, pp. 193–212.
16. IPCC. International Panel on Climate Change. Special report: Global Warming of 1.50C [Electronic resource], 2018, URL: <http://www.ipcc.ch>.
17. Kurbanov E.A., Post W.M. Changes in area and carbon in forests of the Middle Zavolgie: a regional case study of Russian forests, *Climatic change*, 2002, № 1-2, Vol. 55, pp. 157-171.
18. Loboda T., Krankina O.N., Kurbanov E.A. A Joint NASA GOFC-GOLD and NEESPI workshop to examine the natural, socio-economic, and land use impacts of the 2010 drought in European Russia, *The Earth observer*, 2012, Vol. 24(5), pp. 36-40.
19. Loboda T., Krankina O., Savin I., Kurbanov E., Joanne H. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia, *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, Eds. G. Gutman, R. Volker, Springer International Publishing, 2017, pp. 173-192.
20. Qian W. Temporal climatology and anomalous weather analysis, 2017, 687 p.
21. National Centers for Environmental Information, available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/> - 10.05.2019.
22. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals, WMO, N. 1203, World Meteorological Organization, 2017, available at: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166. – 10.11.2019.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ 40-ЛЕТНИХ КУЛЬТУР СОСНЫ РАЗНОЙ ИСХОДНОЙ ГУСТОТЫ

Ю. П. Демаков, Т. В. Нуреева, В. Г. Краснов, А. В. Иванов
Поволжский государственный технологический университет

Отражены результаты оценки производительности 40-летних культур сосны обыкновенной разной исходной густоты (от 0,5 до 11 тыс. экз./га) на стационарном опытном объекте, созданном в сухом бору Силикатного лесничества Республики Марий Эл. Показано, что по мере возрастания исходной густоты культур происходит закономерное уменьшение размеров средних и господствующих деревьев, снижение пределов варьирования их диаметра в древостое, увеличение общей производительности древостоя, а также значений асимметрии и эксцесса распределения, что с высокой достоверностью описывают соответствующие математические уравнения. Средний диаметр деревьев при густоте посадки 11 тыс. экз./га, которая обычно применялась при облесении гарей 1972 года в борах Марийского Заволжья, в 2,3 раза ниже, чем при густоте 500 экз./га. Протяженность кроны среднего дерева различается в 4 раза, коэффициент напряженности роста – в 4,3 раза, объем ствола – в 6 раз, а площадь проекции кроны – в 7,8 раз. Запас крупной и средней древесины наиболее высок в варианте с густотой 1 тыс. экз./га, а таксовая цена древостоя – в варианте с густотой 3 тыс. экз./га. Сделан вывод о том, что в сухих и свежих борах Республики Марий Эл по экономическим критериям целесообразно создавать лесные культуры сосны обыкновенной с исходной густотой не менее 3 тыс. экз./га при условии высокой их сохранности, что позволяет не только существенно снизить затраты на их производство, но и избежать необходимости проведения нерентабельных рубок ухода, обеспечивая длительный интенсивный прирост деревьев. Однако учитывая риски повреждения культур засухами, вредными насекомыми, болезнями и копытными животными, исходную густоту культур целесообразно увеличить до 3,5-4,0 тыс. экз./га.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, лесные культуры, исходная густота, таксационные параметры древостоя, таксовая стоимость, математические модели.

PRODUCTIVITY OF 40-YEAR-OLD PINE PLANTATIONS OF DIFFERENT ORIGINAL DENSITY

Yu. P. Demakov, T. V. Nureeva, V. G. Krasnov, A. V. Ivanov
Volga State Technological University

The paper provides the results of evaluating the productivity of 40-year-old Scots pine plantations of different initial density (from 0.5 thousand trees/ha to 11 thousand trees/ha) at a stationary experimental forestry enterprise established in the dry forest of Silikatnoe forestry enterprise (Republic of Mari El). It has been demonstrated that the increase in the initial density of plantations results in a regular decrease in the size of medium and dominant trees, a decrease in stem diameter, an increase in the overall productivity of the forest stand as well as asymmetry and excesses of distribution. The corresponding mathematical equations ensure the accuracy of calculations. The average diameter of trees with a planting density of 11 thousand trees/ha, which was usually used for afforestation after 1972 forest fires in pine forests of Mari Trans-Volga region, is 2.3 times lower than with a density of 500 trees/ha. The length of the crown of a mean tree is 4 times different, the coefficient of growth tension is 4.3 times different, the trunk volume is 6 times different, and the crown projection area is 7.8 times different. The highest stock of large and medium wood is recorded in a stand with a density of 1 thousand trees/ha, and the highest stumpage price for a stand is recorded in a stand with a density of 3 thousand trees/ha. The authors conclude that in dry fresh pine forests of the Republic of Mari El, it is reasonable to establish Scots pine plantations with the

initial density of no less than 3 thousand trees/ha provided they are highly preserved. It will not only significantly reduce the costs for production of plantations but will also help avoid the unprofitable thinning, thus providing a long-term intensive growth of trees. Taking into account the risks of plantation damage caused by droughts, pests, diseases and ungulates, it is recommended that the initial density of plantations should be increased to 3.5-4.0 thousand trees/ha.

Key words: Scots pine, forest plantations, initial density, dendrometry indicators of a stand, stumpage price, mathematical models.

Введение. Одним из основных факторов, определяющих производительность, товарность и жизнеспособность искусственных лесных насаждений (лесных культур), а также экономическую эффективность процесса их выращивания, является исходная густота посадки. Вопрос об её оптимизации, имеющий большое практическое значение и давно обсуждаемый в литературе (Рубцов В.И., Рубцов В.В., 1975; Вакуров, 1979; Шинкаренко, Дзедзюля, 1983; Юодвалькис, Озолинчюс, 1987; Писаренко и др., 1992; Сухов, 1993), не потерял своей актуальности до наших дней, что объясняется многогранностью проблемы и различием подходов исследователей к ее решению. Платации с интенсивным управлением представляют собой значительные финансовые вложения, которые требуют детального планирования и прогнозирования для обеспечения адекватного возврата (Бузыкин и др., 2002; Усольцев, Маленко, 2008, 2014; Собачкин и др., 2009; Пшеничникова, 2011; Мерзленко, Глазунов, 2014). Важными проблемами в правильном управлении плантацией являются начальная густота посадки, а также контроль, время и интенсивность лесоводственных уходов за ними и оптимальный период выращивания (Weiskitte, 2014; Рогозин, Разин, 2015; Демаков и др., 2016).

В настоящее время исследователями признано, что безотносительного оптимума исходной густоты лесных культур не существует. Он определяется поставленной целью, в качестве которой может выступать либо получение древесины нужного качества и в необходимом количестве в минимально короткие сроки, либо увеличение комплексной продуктивности с учетом всех биологических компонентов лесных экосистем, либо повышение устойчивости и долговечности насаждений, их средообразующих и средоохраняющих функций, а также привлекательности для отдыха людей. Немаловажное значение имеет экономическая составляющая. Так, более низкая густота посадки выгоднее при производстве лесопильной древесины, в то время как более высокая плотность может быть более выгодной для производства биомассы (Węgiel et al., 2018).

Результаты исследований и предлагаемое разделение древостоев на 3 группы с различной густотой показали, что в сосновых насаждениях на почвах, типичных для сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), должно оставаться около 550 деревьев на гектар в древостоях, поступающих в 5-й возрастной класс. Такое количество деревьев означает стабильность в сохранении древесины, и это также приводит к увеличению ее стоимости. Большее количество деревьев на гектар не увеличивает общий объем древесины, а скорее приводит к снижению стоимости товарной древесины (Vembenek et al., 2014). Высокая густота может вызвать чрезмерную конкуренцию за природные ресурсы и несбалансированный вертикальный прирост, ведущие деревья будут более восприимчивы к ветрам (Chirici et al., 2015; Dupont et al., 2015).

Хорошо известно, что здоровье и механическая устойчивость деревьев тесно связаны с густотой насаждений. Marchi и др. (2017) предлагают использовать модельный подход при регулировании густоты и выборе стабильных деревьев в плантациях сосны черной (*Pinus nigra* J.) на основе зависимости количества живых сучьев и соотношения диаметра и высоты (HD).

Исследование сосновых насаждений в Чехии подтвердило существенное негативное влияние метеорологической засухи на прирост диаметра изучаемых сосняков в период последних 30 лет. В то же время наблюдалось значительное положительное влияние более высоких ве-

сенних температур воздуха на годовой прирост диаметра доминирующих деревьев. При этом влияние густоты насаждений на соотношение между ростом диаметра и климатическими характеристиками не было значительным (Novak et al., 2010).

Таким образом, добиться того, чтобы лесные культуры выполняли одновременно все функции по максимуму, ни теоретически, ни практически невозможно, поэтому при создании культур необходимо заранее точно определить целевое назначение будущих насаждений. Оптимальная густота насаждений должна дифференцироваться при этом по природно-климатическим зонам, а в пределах последних – по эдафическим условиям.

Цель исследований заключалась в выборе оптимального варианта исходной густоты культур сосны в борах Марийского Заволжья на основе комплексной оценки производительности и таксовой стоимости древостоя в возрасте 40 лет, обеспечивающего получение наивысшего экономического эффекта.

Объекты исследования. Исследования проведены на стационарном объекте, созданном в кв. 20 Силикатного лесничества на обширной гари 1972 года, расчищенной от погибшего 50-летнего соснового древостоя естественного происхождения (рис. 1). Опытный объект состоит из 15 секций и представляет собой чистые культуры сосны разной исходной густоты (от 0,5 до 11 тыс. экз./га). Рельеф участка ровный, почва слабо гумусированная песчаная сухая, тип лесорастительных условий – сухой бор. Дополнительную обработку почвы после расчистки корчевателем-собирателем Д-513А не проводили. Посадку осуществляли весной 1977 года лесопосадочной машиной СБН-1, используя 2-летние сеянцы сосны. Агротехнических и лесоводственных уходов на опытном объекте не проводилось в течение всего периода развития культур. Результаты исследований, проведенных до 2012 года, опубликованы (Демаков и др., 2016).



Рис.1. Спутниковый снимок опытного объекта в кв. 20 Силикатного лесничества

Материалы и методика исследований. В мае 2018 года на всех 15 секциях объекта был проведен очередной (восьмой по счету) пересчет деревьев с обмером таксационных параметров у 205 моделей. Цифровой эмпирический материал обработан общепринятыми методами математической статистики (Зайцев, 1991; Гринин и др., 2003) на ПК с использованием пакетов стандартных прикладных программ Excel и Statistica. Объем ствола деревьев, фитомассу различных фракций древостоя, его товарную структуру и таксовую цену рассчитывали на основе выведенных нами ранее уравнений (Демаков и др., 2015; Демаков, 2018).

Результаты исследования. Исследования показали, что влияние исходной густоты культур сосны на таксационные параметры 40-летнего древостоя выражено очень четко (табл. 1). Так, к примеру, средний диаметр деревьев при густоте посадки 11 тыс. экз./га, которая обычно применялась при облесении гарей 1972 года в борах Марийского Заволжья, в 2,3 раза ниже, чем при густоте 500 экз./га. Протяженность кроны среднего дерева различается в 4 раза, коэффициент напряженности роста – в 4,3 раза, объем ствола – в 6 раз, а площадь проекции кроны – в 7,8 раз. Густота посадки культур менее всего оказала влияние на высоту деревьев, максимальное значение которой отмечается в варианте с густотой посадки 3 тыс. экз./га, что связано с так называемым эффектом Олли (Одум, 1975; Титов, 1978), согласно которому у объединенных в группу особей, по сравнению с одиночными, значительно повышаются успешность развития и устойчивость к неблагоприятным факторам среды. По мере смыкания древесного полога конкурентные отношения между деревьями приводят к снижению их высоты.

Таблица 1

Параметры среднего дерева в 40-летних культурах сосны разной исходной густоты

Исходная густота, экз./га	Значения параметров*						
	D, см	H, м	K _{нр} **	Объем ствола, м ³	Протяженность кроны		Проекция кроны, м ²
					м	%	
500	21,7	14,0	298	0,264	6,8	48,2	12,5
1000	18,5	14,4	421	0,199	6,4	44,7	10,5
3000	14,1	14,6	733	0,121	5,1	35,2	7,3
5000	12,6	13,8	868	0,094	4,1	29,7	5,9
11000	9,3	11,0	1273	0,044	1,7	15,1	1,6

*Значения всех таксационных параметров вычислены по данным трех повторностей опыта.

**K_{нр} – коэффициент напряженности роста деревьев ($K_{нр} = H / D^2$, где высота и диаметр дерева выражены в метрах).

Расчеты показали, что изменение параметров среднего дерева в 40-летних культурах сосны под влиянием их исходной густоты с высокой достоверностью ($p < 0,001$) описывают следующие уравнения регрессии:

$$D = 14.7 \times \exp(-26.0 \times 10^{-2} \times N) + 8.0; \quad (1)$$

$$H = 0.637 \times (m + 4)^{1.284} \times \exp[-48.38 \times 10^{-4} \times (N + 4)^{2.5}] + 10.5; \quad (2)$$

$$K_{нр} = 283.3 \times N^{0.579} + 150.0; \quad (3)$$

$$V = 0.253 \times \exp(-36.3 \times 10^{-2} \times N) + 0.04; \quad (4)$$

$$L_{кр.} = 6.0 \times \exp(-18.75 \times 10^{-2} \times N) + 1.5; \quad (5)$$

$$Lh = 37.3 \times \exp(-21.35 \times 10^{-2} \times N) + 15.0; \quad (6)$$

$$S_{кр.} = 12.0 \times \exp(-23.56 \times 10^{-2} \times N) + 1.5, \quad (7)$$

в которых: D – средний диаметр деревьев, см; H – средняя высота деревьев, м; $K_{нр}$ – коэффициент напряженности роста, м⁻¹; V – объем ствола, м³; $L_{кр.}$ – абсолютная величина протяженности кроны, м; Lh – относительная величина протяженности кроны, %; $S_{кр.}$ – площадь проекции кроны, м²; N – исходная густота культур, тыс. экз./га.

Исходная густота культур оказывает большое влияние также на характер распределения деревьев по ступеням их толщины: по мере ее увеличения происходит снижение пределов варьирования их диаметра, смещение его средней величины в сторону низких значений и возрастание эксцесса, что особенно резко проявляется в варианте с самой густой посадкой

(рис. 2, табл. 2). Приведенные данные показывают, что дифференциация древостоя происходит при любой густоте посадки, поскольку в ценопопуляциях присутствуют особи, существенно различающиеся как по энергии роста, так и по конкурентоспособности. При свободном стоянии деревьев в варианте с самой низкой густотой посадки полностью раскрывается их жизненный потенциал, который в загущенном древостое проявляется гораздо слабее. Исходная густота культур оказывает влияние не только на параметры среднего дерева в ценопопуляции, но и господствующих особей (табл. 3), существенно снижая их размеры, а также потенциал роста.

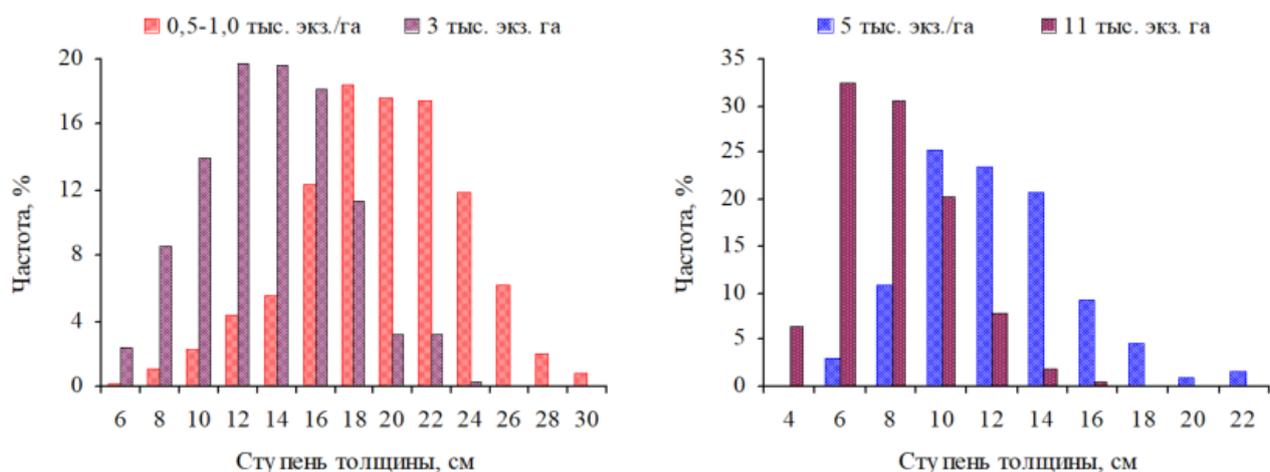


Рис. 2. Распределение деревьев по ступеням толщины в 40-летних культурах сосны разной густоты

Таблица 2
Статистика диаметра деревьев в 40-летних культурах сосны разной исходной густоты

Исходная густота, экз./га	Значения статистических показателей*							
	N	M_x	min	max	S_x	V	A	E
500	341	21,3	8	32	4,18	19,6	-0,356	0,054
1000	403	18,1	6	26	3,82	21,1	-0,487	0,031
3000	424	13,6	6	24	3,65	26,8	0,160	-0,355
5000	425	12,2	6	24	3,21	26,4	0,635	0,669
11000	685	9,0	4	18	2,34	26,0	0,623	0,403

*Обозначения показателей: N – объем выборки, экз.; M_x – среднее арифметическое значение, см; min , max – минимальное и максимальное значения, см; S_x – среднее квадратическое отклонение, см; V – коэффициент вариации, %; A – коэффициент асимметрии распределения; E – коэффициент эксцесса.

Таблица 3
Параметры 500 наиболее крупных деревьев в 40-летних культурах сосны разной густоты

Исходная густота, экз./га	Значения параметров						
	D , см	H , м	K_{np}^*	Объем ствола, м ³	Протяженность кроны		Проекция кроны, м ²
					м	%	
500	21,7	14,0	298	0,264	6,8	48,2	12,5
1000	20,2	14,8	363	0,241	6,7	45,6	11,7
3000	18,0	16,5	511	0,213	5,9	35,7	9,6
5000	16,8	16,1	570	0,183	5,6	34,6	8,4
11000	12,8	12,8	784	0,090	2,1	16,3	3,5

Изменение параметров у 500 наиболее крупных деревьев в 40-летних сосновых культурах под влиянием их исходной густоты с высокой достоверностью ($p < 0,001$) описывают, как показали расчеты, следующие уравнения регрессии:

$$D = 13,0 \times \exp(-11,1 \times 10^{-2} \times N) + 9,0 ; \quad (8)$$

$$H = 0.149 \times (m + 3)^{2.134} \times \exp[-31.85 \times 10^{-4} \times (N + 3)^{2.75}] + 12.5 ; \quad (9)$$

$$K_{np} = 161.3 \times N^{0.536} + 200.0 ; \quad (10)$$

$$V = 0.228 \times \exp(-12.84 \times 10^{-2} \times N) + 0.05 ; \quad (11)$$

$$L_{кр.} = 5.1 \times \exp(-10.9 \times 10^{-2} \times N^{2.269}) + 1.9 ; \quad (12)$$

$$Lh = 33.5 \times \exp(-7.21 \times 10^{-2} \times N^{1.44}) + 15.0 ; \quad (13)$$

$$S_{кр.} = 11.4 \times \exp(-14.26 \times 10^{-2} \times N) + 2.0 . \quad (14)$$

Исходная густота культур сосны, как показали исследования, во много определяет не только параметры деревьев, но и производительность древостоя, которая неуклонно возрастает по мере ее увеличения, достигая предельно возможных значений для данных лесорастительных условий в варианте опыта с самой густой посадкой (табл. 4). Процесс изреживания древостоя протекает в культурах медленнее, чем это требуется для его нормального развития, и его текущая густота увеличивается прямо пропорционально исходной. В результате этого вариант с исходной густотой 11 тыс. экз./га превышает вариант с густотой 500 экз./га по сомкнутости полога 40-летнего древостоя в 4,3 раза, по запасу и абсолютно сухой массе стволов – в 2,6 раза, по массе корней – в 2,2 раза, а по массе хвои – в 3,8 раза. В густых культурах, несмотря на это, эффективность работы ассимиляционного аппарата, как нами ранее было показано (Демаков и др., 2016; Демаков, Нуреева, 2018), ниже, чем в редких, в результате чего он производит меньшее количество массы стволовой древесины. С увеличением исходной густоты культур происходит также возрастание нагрузки на сосущие корни, которым становится всё труднее обеспечивать влагой и питательными веществами крону деревьев, что приводит к их ослаблению и снижению засухоустойчивости. Деревья же в редких культурах наиболее эффективно используют солнечную энергию и депонируют углекислоту.

Таблица 4

Параметры производительности 40-летних культур сосны разной исходной густоты

Исходная густота, экз./га	Сохранность		Сомкнутость крон деревьев	Полнота относит.	Запас, м ³ /га	Фитомасса, т/га			
	экз./га	%				стволов	ветвей	корней	хвои
500	396	82,1	0,50	0,43	104	47,3	5,9	19,3	2,27
1000	728	73,8	0,85	0,57	145	65,7	8,0	24,3	3,18
3000	1723	59,8	1,65	0,78	209	94,3	11,5	30,5	4,78
5000	2303	47,4	1,93	0,86	215	97,5	12,2	31,4	5,31
11000	6109	55,5	2,14	1,37	269	122,9	16,8	41,8	8,60

Изменение параметров древостоя в 40-летних сосновых культурах под влиянием их исходной густоты с высокой достоверностью ($p < 0,001$) описывают, как показали расчеты, следующие уравнения регрессии:

$$N_{40} = 743 \times N_0^{0.716} ; \quad (15)$$

$$W = 61.3 \times \exp(-20.3 \times 10^{-2} \times N_0) + 25.5 ; \quad (16)$$

$$S = 2.14 \times [1 - \exp(-50.4 \times 10^{-2} \times N_0)] ; \quad (17)$$

$$P = 1.24 \times [1 - \exp(-39.2 \times 10^{-2} \times N_0)] ; \quad (18)$$

$$V = 238 \times [1 - \exp(-96.0 \times 10^{-2} \times N_0)] ; \quad (19)$$

$$M_{ств.} = 108.1 \times [1 - \exp(-95.1 \times 10^{-2} \times N_0)] ; \quad (20)$$

$$M_{вет.} = 14.3 \times [1 - \exp(-76.1 \times 10^{-2} \times N_0)] ; \quad (21)$$

$$M_{кор.} = 34.8 \times [1 - \exp(-133.8 \times 10^{-2} \times N_0)]; \quad (22)$$

$$M_{хв.} = 8.32 \times [1 - \exp(-30.0 \times 10^{-2} \times N_0)], \quad (23)$$

в которых: N_0 – исходная густота культур, тыс. экз./га; N_{40} – густота древостоя в возрасте 40 лет, тыс. экз./га; W – сохранность деревьев в культурах, %; S – сомкнутость полога древостоя, отн. един.; P – полнота древостоя относительная, доля един.; V – запас стволовой древесины, м³/га; $M_{ств.}$ – абсолютно сухая масса стволов с корой, т/га; $M_{вет}$ – абсолютно сухая масса ветвей, т/га; $M_{кор.}$ – абсолютно сухая масса корней, т/га; $M_{хв.}$ – абсолютно сухая масса хвои, т/га.

Окончательное решение по выбору оптимального варианта исходной густоты культур можно сделать лишь на основе оценки товарной структуры и таксовой цены древостоя. Суммарный запас крупной и средней древесины в 40-летних культурах наиболее высок, как показали расчеты, в варианте с густотой 1 тыс. экз./га, а таксовая цена древостоя – в варианте с густотой 3 тыс. экз./га (табл. 5). Запасы же мелкой, дровяной и неликвидной древесины максимальны в варианте с самой высокой густотой.

Таблица 5

Товарная структура и таксовая цена древостоя в 40-летних культурах сосны разной густоты

Исходная густота, экз./га	Запас древесины различных категорий, м ³ /га					Таксовая цена, тыс. руб./га
	крупная	средняя	мелкая	дрова	неликвид	
500	5,7	57,3	25,4	3,5	12,1	13,24
1000	2,0	65,8	54,7	5,2	17,3	16,60
3000	0,0	44,6	129,9	9,0	25,5	19,69
5000	0,0	27,4	151,9	10,2	25,5	18,68
11000	0,0	0,0	221,3	16,0	31,7	18,34

Изменение параметров товарной структуры 40-летнего древостоя в культурах сосны под влиянием их исходной густоты с высокой достоверностью ($p < 0,001$) описывают следующие уравнения регрессии:

$$V_{кр+ср} = 100.5 \times N_0^{0.382} \times \exp(-40.0 \times 10^{-2} \times N_0); \quad (24)$$

$$V_{мел} = 61.2 \times N_0^{0.548}; \quad (25)$$

$$V_{др} = 5.05 \times N_0^{0.476}; \quad (26)$$

$$V_{нел} = 16.9 \times N_0^{0.272}; \quad (27)$$

$$C_{такс} = 16.73 \times N_0^{0.242} \times \exp(-4.56 \times 10^{-2} \times N_0); \quad (28)$$

в которых: N_0 – исходная густота культур, тыс. экз./га; $V_{кр+ср}$ – запас крупной и средней древесины, м³/га; $V_{мел}$ – запас мелкой древесины, м³/га; $V_{др}$ – запас дровяной древесины, м³/га; $V_{нел}$ – запас неликвидной древесины, м³/га; $C_{такс}$ – таксовая цена всей древесины на корню, тыс. руб./га.

Таким образом, результаты проведенного исследования убедительно свидетельствуют об экономической эффективности создания лесных культур сосны обыкновенной в сухих и свежих борах Республики Марий Эл с исходной густотой не менее 3,0 тыс. экз./га (при условии их высокой сохранности), что позволяет не только существенно снизить затраты на их производство, но и избежать необходимости проведения нерентабельных рубок ухода (Сеннов, 1984; Загреев, Сеницын, 1988), обеспечивая длительный интенсивный прирост деревьев. При этом, однако, необходимо иметь в виду риски повреждения культур вредными насекомыми, болезнями и копытными животными, с учетом воздействия которых исходную густоту культур целесообразно увеличить до 3,5-4,0 тыс. экз./га.

Выводы

1. По мере возрастания исходной густоты 40-летних культур сосны происходит закономерное уменьшение размеров средних и господствующих деревьев, снижение пределов варьирования их диаметра в древостое, а также увеличение значений асимметрии и эксцесса распределения, что с высокой достоверностью описывают соответствующие математические уравнения.

2. Дифференциация древостоя происходит при любой густоте посадки, поскольку в ценопопуляциях присутствуют особи, существенно различающиеся как по энергии роста, так и по конкурентоспособности. При свободном стоянии деревьев в варианте с самой низкой густотой посадки полностью раскрывается их жизненный потенциал, который в загущенном древостое проявляется гораздо слабее.

3. Процесс изреживания древостоя протекает в культурах медленнее, чем это требуется для его нормального развития, и его текущая густота увеличивается прямо пропорционально исходной, что приводит к неуклонному возрастанию конкурентных отношений между деревьями и торможению их роста. Вариант с исходной густотой 11 тыс. экз./га превышает вариант с густотой 500 экз./га по сомкнутости полога 40-летнего древостоя в 4,3 раза.

4. Производительность древостоя неуклонно возрастает по мере увеличения исходной густоты культур сосны, достигая предельно возможных значений для данных лесорастительных условий в варианте опыта с самой густой посадкой. Запас крупной и средней древесины наиболее высок в варианте с густотой 1 тыс. экз./га, а таксовая цена древостоя – в варианте с густотой 3 тыс. экз./га.

5. В сухих и свежих борах Республики Марий Эл по экономическим критериям целесообразно создавать лесные культуры сосны обыкновенной с исходной густотой не менее 3 тыс. экз./га, что позволяет не только существенно снизить затраты на их производство, но и избежать необходимости проведения нерентабельных рубок ухода, обеспечивая длительный интенсивный прирост деревьев. Но с учетом высоких рисков весенних засух, повреждения культур вредными насекомыми, болезнями и копытными животными, исходную густоту культур целесообразно увеличить до 3,5-4,0 тыс. экз./га.

Библиографический список

1. Бузыкин, А.И. Густота и продуктивность древесных ценозов / А.И. Бузыкин, Л.С. Пшеничникова, В.Г. Суховольский. – Новосибирск: Наука, 2002. – 152 с.
2. Вакуров, А. Д. Тридцатилетний опыт выращивания сосновых культур разной густоты под Москвой / А.Д. Вакуров // Лесоведение. – 1979. – № 6. – С. 81-85.
3. Гринин, А. С. Математическое моделирование в экологии / А.С. Гринин, Н.А. Орехов, В.Н. Новиков. – Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 269 с.
4. Демаков, Ю. П. Структура и закономерности развития лесов Республики Марий Эл / Ю.П. Демаков. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – 432 с.
5. Демаков, Ю. П. Использование аллометрических зависимостей для оценки фитомассы различных фракций деревьев и моделирования их динамики / Ю.П. Демаков, А.С. Пуряев, В.Л. Черных, Л.В. Черных // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 2. – С. 19-36.
6. Демаков, Ю. П. Закономерности развития древостоя в культурах сосны обыкновенной разной исходной густоты / Ю.П. Демаков, Т. В.Нуреева, А.С. Пуряев, А. А. Рыжков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2016. – № 4 (32). – С. 19-33.
7. Демаков, Ю. П. Производительность хвой и камбия среднего дерева в культурах сосны разной исходной густоты / Ю.П. Демаков, Т. В.Нуреева // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: международный сборник научных статей. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – С. 75-81.
8. Загребев, В. В. Древесный отпад: величина, товарная структура, использование / В.В. Загребев, С.Г. Синицын // Лесное хозяйство. – 1988. – № 11. – С. 33-37.
9. Зайцев, Г. Н. Математический анализ биологических данных / Г.Н. Зайцев. – Москва: Высшая школа, 1991. – 182 с.

10. Мерзленко, М. Д. Рост и состояние культур сосны разной густоты в Серебряноборском опытном лесничестве / М.Д. Мерзленко, Ю.Б. Глазунов // ИВУЗ: Лесной журнал. – 2014. – № 6. – С. 32-40.
11. Одум, Ю. Основы экологии / Ю. Одум. – М.: Мир, 1975. – 740 с.
12. Писаренко, А. И. Искусственные леса / А.И. Писаренко, Г.И. Редько, М.Д. Мерзленко. – Москва: ВНИИЦлесресурс, 1992. Ч. 2. – 239 с.
13. Пшеничникова, Л. С. Влияние густоты экспериментальных посадок на радиальный прирост лиственницы сибирской / Л.С. Пшеничникова // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2011. – № 28. – С. 61-65.
14. Рогозин, М. В. Развитие древостоев. Модели, законы, гипотезы / М.В. Рогозин, Г.С. Разин. – Пермь: ПГНИУ, 2015. – 277 с.
15. Рубцов, В. И. Биологическая продуктивность 20-летних культур сосны при разной густоте посадки / В.И. Рубцов, В.В. Рубцов // Лесоведение. – 1975. – № 1. – С. 28-36.
16. Сеннов, С. Н. Уход за лесом (экологические основы) / С.Н. Сеннов. – Москва: Лесная промышленность, 1984. – 128 с.
17. Собачкин, Д. С. Влияние густоты на таксационные показатели сосновых молодяков естественного и искусственного происхождения / Д.С. Собачкин, В.Е. Бенькова, Р.С. Собачкин, А.И. Бузыкин // Лесоведение. – 2009. – № 2. – С. 3-9.
18. Сухов, И. В. Закономерности роста и продуктивности опытных культур сосны разной густоты в Воронежской области / И.В. Сухов // Сосновые леса России в системе многоцелевого лесопользования. – Воронеж: ВЛТИ, 1993. – Кн. 2. – С. 40-41.
19. Титов, Ю. В. Эффект группы у растений / Ю.В. Титов. – Ленинград: Наука, 1978. – 151 с.
20. Усольцев, В. А. Культуры сосны разной густоты посадки и проблема ее оптимизации / В.А. Усольцев, А.А. Маленко // Ботанические исследования в Сибири. Вып. 16. – Красноярск: Красноярское отд. Российского ботанического общества, 2008. – С. 136-164.
21. Усольцев, В. А. Лесные культуры разной начальной густоты. Сообщение 1. Оптимизационные аспекты группы и плотности / В.А. Усольцев, А.А. Маленко // Эко-потенциал. – 2014. – № 3 (7). – С. 23-33.
22. Усольцев, В. А. Лесные культуры разной начальной густоты. Сообщение 2. Анализ опытных посадок сосны обыкновенной / В.А. Усольцев, А.А. Маленко // Эко-потенциал. – 2014. – № 3 (7). – С. 34-47.
23. Шинкаренко, И. Б. Оптимизация режимов густоты при целевом выращивании сосновых культур / И.Б. Шинкаренко, А.А. Дзедзюля // Лесоведение и лесоводство: Обзорная информация ЦБНТИлесхоз. – 1983. – № 3. – С. 1-40.
24. Юодвалькис, А. И. Лесоводственно-биологические аспекты оптимизации первоначальной густоты сосновых насаждений / А.И. Юодвалькис, Р.В. Озолинчюс // Лесное хозяйство. – 1987. – № 9. – С. 20-22.
25. Bembenek, M. Value of merchantable timber in scots pine stands of different densities/ M. Bembenek, Z. Karaszewski, K. Kondracki, A. Łacka, P.S. Mederski, M. Skorupski, P. Strzeliński, S. Sułkowski, A. Węgie // WOOD: Research papers. Research reports. Announcements. – 2014. – Vol. 57, No. 192. – P.133-142.
26. Chirici, G. Attivita di monitoraggio dei danni da vento ai comprensori forestali della Regione Toscana a seguito dell'evento del 5 marzo 2015 / G. Chirici, L. Bottai, F. Bottalico, A. Bronzi, C. Chiostrini, O. Ciancio, M. Fioravanti, M. Germani, F. Giannetti, B. Gozzini, E. Gravano, A.M. Melara, S. Nocentini, D. Travaglini // In SiSEF (Ed.), SiSEF National Congress. - Abstract Book. Florence.
27. Dupont, S. Wind damage propagation in forests. / S. Dupont, D. Pivato, Y. Brunet // Agricultural and Forest Meteorology. – Vol. 214-215. – P. 243-251.
28. Marchi, M. Assessing the mechanical stability of trees in artificial plantations of *Pinus nigra* J. F. Arnold using the LWN tool under different site indexes / M. Marchi, U. Chiavetta, P. Cantiani // Annals of Silvicultural Research. – 2017. – Vol. 41. – № 1. – P.48-53.
29. Novak, J. The effect of different stand density on diameter growth response in Scots pine stands in relation to climate situations / J. Novak, M. Slodicak, D. Káčálek, D. Dušek // Journal of Forest Science. – 2010. – Vol.56. – №10. – P. 461-473.
30. Weiskitte, A. R. Forest Growth and Yield Models for Intensively Managed Plantations. The / J.G. Borges, L. Diaz-Balteiro, M.E. McDill, L.C.E. Rodriguez // Management of Industrial Forest Plantations. Projects: The Management of Industrial Forest Plantations. Theoretical Foundations and Applications Forest Growth and Yield Modeling Plantation Models. – Editors, 2014. – P.61-91.
31. Węgie, A. Relationship between stand density and value of timber assortments: a case study for Scots pine stands in north-western Poland / A. Węgie, M. Bembenek, A. Łacka, P. S. Mederski // New Zealand Journal of Forestry Science. – 2018. – Vol. 48, № 12. – P. 2-9.

References

1. Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S., Sukhovol'skii V.G. Gustota i produktivnost' drevesnykh tsenozov [Density and productivity of wood cenoses], Novosibirsk, Nauka, 2002, 152 p.
2. Vakurov A. D. Tridtsatiletnii opyt vyrashchivaniya sosnovykh kul'tur raznoi gustoty pod Moskvoy [Thirty years of experience growing pine crops of different densities near Moscow], *Lesovedenie* [Forest science], 1979, No. 6, pp. 81-85.
3. Grinin A.S., Orekhov N.A., Novikov V.N. Matematicheskoe modelirovanie v ekologii [Mathematical modeling in ecology], Moscow, YuNITI-DANA, 2003, 269 p.
4. Demakov, Yu. P. Struktura i zakonomernosti razvitiya lesov Respubliki Marii El [The structure and patterns of forest development of the Mari El Republic], Yoshkar-Ola: PGTU, 2018, 432 p.

5. Demakov Yu.P., Puryaev A.S., Chernykh V.L., Chernykh L.V. Ispol'zovanie allometricheskikh zavisimosti dlya otsenki fitomassy razlichnykh fraktsii derev'ev i modelirovaniya ikh dinamiki [The use of allometric dependencies for assessing the phytomass of various tree fractions and modeling their dynamics], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature management], 2015, No. 2, pp. 19-36.
6. Demakov Yu.P., Nureeva T.V., Puryaev A.S., Ryzhkov A.A., Zakonomernosti razvitiya drevostoya v kul'turakh sosny obyknovnoy raznoi iskhod-noi gustoty [Patterns of development of the stand in the cultures of common pine of different initial density], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature management], 2016, No. 4 (32), pp. 19-33.
7. Demakov Yu.P., Nureeva T.V. Proizvoditel'nost' khvoi i kambiya srednego dereva v kul'turakh sosny raznoi iskhod-noi gustoty [Productivity of conifers and cambium of a middle tree in pine crops of different initial density], *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring* [Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring]: *mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh statei*, Yoshkar-Ola: PGTU, 2018, pp. 75-81.
8. Zagreev V.V., Sinitsyn S.G. Drevesnyi otpad: velichina, tovarnaya struktura, ispol'zovanie [Woody mortality: size, commodity structure, using], *Lesnoe khozyaistvo* [Forestry], 1988, No. 11, pp. 33-37.
9. Zaitsev G. N. Matematicheskiy analiz biologicheskikh dannyykh [Mathematical Analysis of Biological Data], Moscow, Vysshaya shkola, 1991, 182 p.
10. Merzlenko M.D., Glazunov Yu.B. Rost i sostoyanie kul'tur sosny raznoi gustoty v Serebryanoborskom opytном lesnichestve [Growth and condition of pine crops of different densities in Serebryanoborsky experimental forestry], *IVUZ, Lesnoi zhurnal* [Forest magazine], 2014, No. 6, pp. 32-40.
11. Odum Yu. Osnovy ekologii [Fundamentals of ecology], Moscow, Mir, 1975, 740 p.
12. Pisarenko A.I., Red'ko G.I., Merzlenko M.D. Iskusstvennye lesa [Planted forests], Moscow, VNIITslesresurs, 1992, Part 2, pp.239.
13. Pshenichnikova L.S. Vliyanie gustoty eksperimental'nykh posadok na radial'nyi prirost listven-nitsy sibirskoi [The influence of the density of experimental plantings on the radial growth of Siberian larch], *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2011, No. 28, pp. 61-65.
14. Rogozin M.V., Razin G.S. Razvitie drevostoev. Modeli, zakony, gipotezy [The development of stands. Models, laws, hypotheses], Perm', PGNIU, 2015, 277 p.
15. Rubtsov V.I., Rubtsov V.V. Biologicheskaya produktivnost' 20-letnikh kul'tur sosny pri raznoi gustote posadki [Biological productivity of 20-year-old pine crops with different planting densities], *Lesovedenie* [Forest science], 1975, No. 1, pp. 28-36.
16. Sennov S.N. Ukhod za lesom (ekologicheskie osnovy) [Forest care (environmental fundamentals)], Moscow, *Lesnaya promyshlennost'* [Forest industry], 1984, 128 p.
17. Sobachkin D.S., Ben'kova V.E., Sobachkin R.S., Buzykin A.I. Vliyanie gustoty na taksatsionnye pokazateli sosnovykh molodnyakov estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya [The influence of density on taxation indicators of pine young growths of natural and artificial origin], *Lesovedenie* [Forest science], 2009, No. 2, pp. 3-9.
18. Sukhov I.V. Zakonomernosti rosta i produktivnosti opytnykh kul'tur sosny raznoi gustoty v Voronezhskoi oblasti [Patterns of growth and productivity of experimental pine crops of different densities in the Voronezh region], *Sosnovye lesa Rossii v sisteme mnogotselevogo lesopol'zovaniya* [Russian Pine Forests in the Multipurpose Forest Management System], Voronezh, VLTI, 1993, Book 2, pp. 40-41.
19. Titov Yu.V. Effekt gruppy u rastenii [Group effect in plants], Leningrad, Nauka, 1978, 151 p.
20. Usoltsev V.A., Malenko A.A. Kul'tury sosny raznoi gustoty posadki i problema ee optimizatsii [Pine crops of different planting density and the problem of its optimization], *Botanicheskie issledovaniya v Sibiri* [Botanical research in Siberia], Release 16, Krasnoyarsk, Krasnoyarskoe otd. Rossiiskogo botanicheskogo obshchestva, 2008, pp. 136-164.
21. Usoltsev V.A., Malenko A.A. Lesnye kul'tury raznoi nachal'noi gustoty. Soobshchenie 1. Optimizatsionnye aspekty gruppy i plotnosti xForest crops of different initial densities. Communication 1. Optimization aspects of the group and density], *Eko-potentsial* [Eco potential], 2014, No. 3 (7), pp. 23-33.
22. Usoltsev V.A., Malenko A.A. Lesnye kul'tury raznoi nachal'noi gustoty. Soobshchenie 2. Analiz opytnykh posadok sosny obyknovnoy [Forest crops of different initial densities. Message 2. Analysis of experimental plantings of Scots pine], *Eko-potentsial* [Eco potential], 2014, No. 3 (7), pp. 34-47.
23. Shinkarenko I.B., Dzedzyulya A.A. Optimizatsiya rezhimov gustoty pri tselevom vyrashchivaniy sosnovykh kul'tur [Optimization of density regimes for targeted cultivation of pine crops], *Lesovedenie i lesovodstvo* [Forestry science and forestry]: *Obzornaya informatsiya*, TsBNTIleskhoz, 1983, No. 3, pp. 1-40.
24. Yuodval'kis A.I., Ozolinchys R.V. Lesovodstvenno-biologicheskie aspekty optimizatsii pervonachal'noi gustoty sosnovykh nasazhdenii [Forestry-biological aspects of optimization of the initial density of pine plantations], *Lesnoe khozyaistvo* [Forestry], 1987, No. 9, pp. 20-22.
25. Bembenek M., Karaszewski Z., Kondracki K., Łacka A., Mederski P.S., Skorupski M., Strzeliński P., Sułkowski S., Węgie A. Value of merchantable timber in scots pine stands of different densities, *WOOD: Research papers. Research reports. Announcements*, 2014, Vol. 57, No. 192, pp.133-142.
26. Chirici G., Bottai L., Botalico F., Bronzi A., Chiostrì C., Ciancio O., Fioravanti M., Germani M., Giannetti F., Gozzini B., Gravano E., Melara AM., Nocentini S., Travaglini D. Attivita di monitoraggio dei danni da vento ai compensori forestali della Regione Toscana a seguito dell'evento del 5 marzo 2015., *SISEF National Congress - Abstract Book*. Florence.

27. Dupont S., Pivato D., Brunet Y. Wind damage propagation in forests, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 214-215, pp. 243–251.
28. Marchi M., Chiavetta U., Cantiani P. Assessing the mechanical stability of trees in artificial plantations of *Pinus nigra* J. F. Arnold using the LWN tool under different site indexes, *Annals of Silvicultural Research*, 2017, Vol. 41, № 1, pp.48-53.
29. Novak J., Slodicak M., Kacálek D., Dušek D. The effect of different stand density on diameter growth response in Scots pine stands in relation to climate situations, *Journal of Forest Science*, 2010, Vol.56, No. 10, pp. 461-473.
30. Weiskitte A.R., Borges J.G., Diaz-Balteiro L., McDill M.E., Rodriguez L.C.E. Forest Growth and Yield Models for Intensively Managed Plantations. In book: *The Management of Industrial Forest Plantations. Projects: The Management of Industrial Forest Plantations. Theoretical Foundations and Applications Forest Growth and Yield Modeling Plantation Models*, 2014, pp.61-91.
31. Węgie A., Bembenek M., Łacka A., Mederski P.S. Relationship between stand density and value of timber assortments: a case study for Scots pine stands in north-western Poland, *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2018, Vol. 48, No. 12, pp. 2-9.

НАРУШЕННОСТЬ ХВОЙНЫХ ЛЕСОВ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

Э. А. Терехин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Нарушенность верхних ярусов лесных массивов, обусловленная влиянием пожаров, сплошных лесосечных рубок или насекомых-вредителей, является одним из ключевых факторов, определяющих состояние лесных экосистем. В статье изложены результаты анализа нарушения хвойных лесов лесостепной зоны Центрального Черноземья, обусловленной воздействием негативных факторов в период 2000-2018 гг. С использованием автоматизированного подхода на основе разновременной многозональной спутниковой съемки Landsat выполнено геоинформационное картографирование участков нарушенных хвойных лесных экосистем, появившихся в соответствующий период. В 2000-2018 гг. доля нарушенных лесов составила 18,4 % от общей площади хвойных лесных массивов. Наиболее высоких значений этот показатель достигает на юге лесостепной зоны – в Воронежской и Белгородской области. Доля хвойных лесов и смешанных лесов с присутствием хвойных пород в общей площади нарушенных лесных экосистем составляет 76 %. Лесные массивы с долей нарушенных участков более 25 % в хвойных лесах составляют более четверти от общей площади. Леса, нарушенность верхних ярусов которых составляет не более 10 %, занимают 60 % всех хвойных лесов. С использованием спутниковых данных Landsat-8 изучена спектрально-отражательная способность хвойных лесных экосистем с разной долей нарушенных лесных участков. В спектральных диапазонах 1,56-1,66 мкм, 2,1-2,3 мкм установлена тенденция к последовательному увеличению коэффициентов спектральной яркости вследствие увеличения доли нарушенных участков в лесных массивах. Воздействие болезней деревьев и лесные пожары в исследуемый период являлись основными причинами высокой нарушенности древостоя хвойных лесов.

Ключевые слова: лесные экосистемы, лесостепь, нарушенность лесов, геоинформационное картографирование, спутниковые данные, Landsat.

DISTURBANCE OF CONIFEROUS FOREST IN THE FOREST-STEPPE ZONE OF RUSSIA AT THE BEGINNING OF THE XXI CENTURY

E. A. Terekhin

Belgorod State National Research University

The overstorey of forest cover may be disturbed by fires, clear felling or pests being the key factors determining the condition of forest ecosystems. This paper presents the results of disturbance analysis in coniferous forests of the forest-steppe zone of the Central Chernozemye Region of Russia over the period from 2000 to 2018. Geo-information mapping of disturbed coniferous areas was carried out using Landsat multi-temporal multispectral satellite images. In 2000-2018 the share of disturbed forests was 18.4 % of the total area of coniferous forests. This indicator is the highest in the south of the forest-steppe zone - in the Voronezh and Belgorod regions. The share of coniferous forests in the total area of disturbed forest ecosystems is 76 %. Forests with a share of disturbed areas exceeding 25 % make up more than a quarter of the total area of coniferous forests. Forests with up to 10 % disturbed overstorey occupy 60 % of all coniferous forests. The spectral reflectivity of disturbed coniferous forest was studied using Landsat-8 data. In the spectral bandwidth between 1.56-1.66 μm and 2.1-2.3 μm there is a trend toward a gradual increase in reflectance as a result of the growing areas of disturbed forest. The main causes of disturbance revealed in coniferous forest are the impact of wood diseases and forest fires.

Key words: forest ecosystems, forest-steppe, forest disturbance, GIS-mapping, satellite data, Landsat.

Введение. Оценка нарушенности верхних ярусов лесных экосистем, обусловленной влиянием пожаров, сплошных лесосечных рубок или насекомых-вредителей является ключевой задачей при анализе лесных экосистем. Значительные возможности при ее анализе представляют разновременные многозональные данные дистанционного зондирования (Барталев и др., 2016). Несмотря на то, что по спутниковым материалам во многих случаях возможен анализ нарушений, затрагивающих только верхние ярусы, использование космических снимков, полученных в разные годы, часто выступает единственным способом решения задач ретроспективной оценки нарушенности лесов (Курбанов и др., 2013; Kim et al., 2014; White et al., 2017).

В связи с этим развитие методов автоматизированного картографирования участков нарушенных лесных массивов в настоящее время является одним из ключевых направлений обработки данных дистанционного зондирования Земли и лесного мониторинга (Healey et al., 2005; Курбанов и др., 2015; Воробьев и др., 2016). Картограммы участков нарушенных лесных экосистем дают возможность выполнять пространственно-временной анализ нарушенности (Potarov et al., 2015), в связи с чем их подготовка необходима для получения объективных представлений о динамике лесных экосистем.

К настоящему времени применение разновременных спутниковых снимков позволило создать глобальные карты изменений в лесах (Потапов и др., 2008; Hansen et al., 2013; Feng, 2016). При этом картографирование нарушенности лесов на региональном уровне остается весьма актуальной задачей, оно необходимо для изучения тенденций развития растительного покрова.

Леса лесостепной зоны Центрального Черноземья были существенно трансформированы вследствие аграрного освоения территории (Чендев, 2008). С конца XVI в. по 2008 г. лесистость региона снизилась в 3,6 раза (Бугаев и др., 2013). Современные леса играют крайне важную роль в сохранении биоразнообразия и выполняют водоохранные и экологические функции. В лесах доминируют широколиственные породы. Массивы хвойных лесов, основу которых составляют сосновые насаждения, представлены в меньшей степени и распространены преимущественно по левобережьям наиболее крупных рек региона. Тем не менее, с учетом их размещения вблизи речных систем и большей подверженностью влиянию негативных факторов, мониторинг их состояния крайне необходим. Кроме хвойных насаждений в северо-восточной части региона (Липецкая, Тамбовская области), а также в его северо-западной части распространены смешанные лесные насаждения со значительной долей хвойных лесов.

Как показали результаты ранее выполненных исследований (Терехин, 2017), на юге Среднерусской возвышенности площади хвойных лесных экосистем изменяются более динамично, чем лиственных. В связи с этим картографирование и оценка нарушенности древостоя хвойных лесов в начале XXI века является актуальной задачей.

Цель исследования состояла в оценке нарушенности хвойных лесов лесостепной зоны Центрального Черноземья в период 2000-2018 гг. **Задачами** исследования являлись:

1. Оценка доли лесов с нарушенными верхними ярусами от общей площади хвойных лесных массивов.
2. Анализ доли хвойных лесных насаждений от общей площади нарушенных лесов.
3. Оценка площади хвойных лесных массивов с разной долей нарушенных лесных участков (0-3 %, 4-10 %, 11-25 %, 26-50 %, 51-100 %).

4. Количественный анализ спектрально-отражательных характеристик хвойных лесных экосистем с разной долей нарушенных лесных ареалов.

Материалы, объект и методы исследования. Объектами исследования выступали хвойные лесные массивы Центрального Черноземья, а также смешанные леса с наличием хвойных пород. Исследуемые леса были представлены на всей территории региона, а также в Орловской области. Территория исследования охватывала лесостепную зону от ее границы с лесной зоной на северо-западе Орловской до границы с зоной степи на юго-востоке Белгородской и юге Воронежской областей (рис. 1).

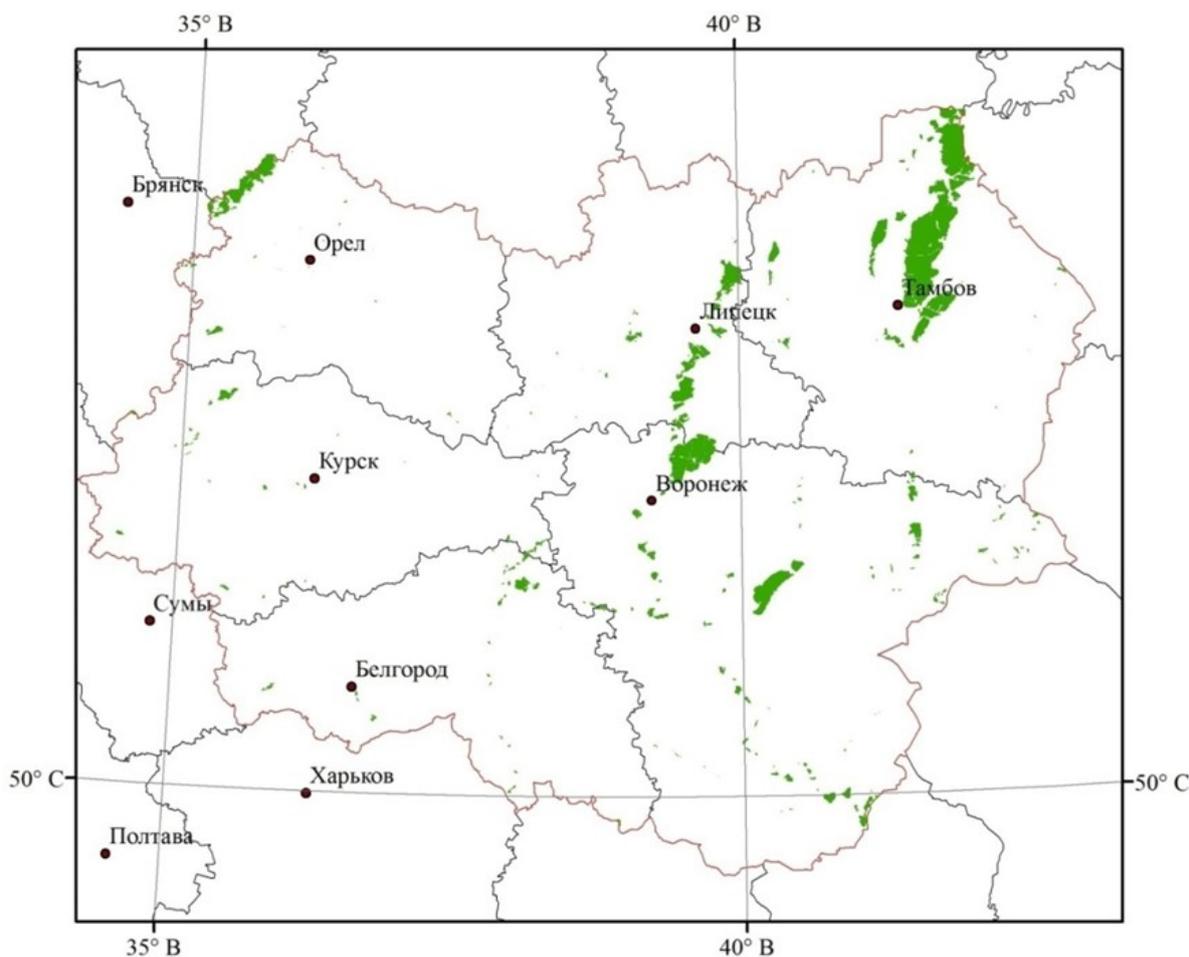


Рис. 1. Местоположение исследуемых лесных массивов

Для исследования было отобрано 435 лесных массивов (табл. 1), включая крупнейшие хвойные леса региона. С целью обеспечения репрезентативности лесные массивы для исследования отбирались таким образом, чтобы быть представлены в большинстве ячеек 30×30 км сети, на которую была разбита вся территория исследования. Соответствующий размер ячейки был подобран эмпирически. В связи с тем, что хвойные леса, в отличие от широколиственных, распространены в регионе в меньшей степени, они были представлены во многих, но не во всех таких ячейках. Обусловлено это тем, что сосновые леса распространены в лесостепи локально и приурочены в основном к левобережьям наиболее крупных рек.

**Характеристики проанализированных хвойных и смешанных
с преобладанием хвойных лесных массивов**

Регион	Общая площадь, га	Число лесных массивов	Средняя площадь, га
Белгородская область	15701,2	53	296,2
Воронежская область	115984,6	171	678,3
Курская область	13270,4	36	368,6
Липецкая область	82072,9	60	1367,9
Орловская область	42056,3	40	1051,4
Тамбовская область	252519,0	75	3366,9
Всего	521604,4	435	1199,1

На следующем этапе было выполнено картографирование отобранных лесных массивов, которое осуществлялось методом ручной оцифровки их контуров в геоинформационной среде на основе снимков Sentinel-2 MSI вегетационного периода 2018 г. с пространственным разрешением 10 м/пиксель. Таким способом был подготовлен векторный слой всех анализируемых лесных экосистем, который в дальнейшем использовали для анализа их спектрально-отражательных характеристик и оценке нарушенности.

Основной экспериментальный этап состоял в геоинформационном, автоматизированном картографировании нарушенных участков исследуемых лесов на основе их спектрально-отражательных характеристик. Для этого был использован ранее предложенный подход (Терехин, 2019), суть которого заключается в использовании функций классификации, рассчитанных методом дискриминантного анализа. Функции (уравнения) используют в качестве независимых переменных величину изменения коэффициентов отражения (коэффициентов спектральной яркости, КСЯ) в трех спектральных зонах (1,55-1,75 мкм), SWIR (2,09-2,35 мкм) и NIR (0,75-0,90 мкм). Величина изменения рассчитывается между конечной и начальной анализируемыми датами. В нашем случае это 2018 г. и 2000 г. Для каждого пикселя на основе предложенных уравнений рассчитывается 2 значения классификационного веса. Пиксель классифицируется в ту категорию (нарушенные/ненарушенные), для которой значение классификационного веса оказалось больше. Точность выявления нарушенных лесных экосистем на основе данного способа составляет 90 %.

Для реализации соответствующего подхода на территорию исследования была выполнена подборка снимков Landsat TM/ETM+ 2000 г. и Landsat OLI 2018 г. с пространственным разрешением 30 м/пиксель (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Пары разновременных снимков были отобраны таким образом, чтобы покрывать всю территорию региона, и охватывали 17 спутниковых сцен (path/row). Разновременные изображения стремились подбирать так, чтобы они были получены в максимально близкие даты вегетационного периода. Все снимки прошли атмосферную и радиометрическую коррекцию с переводом в безразмерные коэффициенты отражения. После этого на основе пар разновременных снимков были вычислены величины разности коэффициентов отражения в трех спектральных зонах: ближней инфракрасной (NIR) и двух средних инфракрасных (SWIR1 и SWIR2), соответствующих каналам 4, 5, 7 сенсора Landsat TM/ETM+ или каналам 5, 6, 7 сенсора Landsat OLI. Полученные растры разности КСЯ для каждой спутниковой сцены Landsat были использованы в функциях классификации как независимые переменные. В результате получено 17 растров, характеризующих местоположение нарушенных лесов и лесов без признаков нарушений верхних ярусов. На их основе в программе ArcGIS была получена единая картограмма, характеризующая распространение нарушенных лесов на территории лесостепи Центрального Черноземья. С ее использованием вычислили долю лесов, нарушенных в период 2000-2018 гг. для каждого исследуемого лесного массива, площадь лесов с нарушениями верхних яру-

сов в областях региона, долю лесных массивов с разной степенью нарушенности: 0-3 %, 4-10 %, 11-25 %, 26-50 %, 51-100 %.

Для градаций степени нарушенности (от 0 до 100 %) использована нарастающая шкала, диапазоны ячеек которой растут по зависимости, близкой к степенной. Соответствующая градация была подобрана эмпирически в соответствии с правилом (Арманд, 1975), по которому шкала градаций должна делиться на отрезки равной информативности и сгущение баллов должно производиться в той части шкалы, где она дает наибольшую информацию.

Следующий этап состоял в анализе коэффициентов спектральной яркости для каждой градации нарушенных лесных экосистем (0-100 %) на конечную анализируемую дату (2018 г.). Для решения этой задачи использован спутниковый снимок Landsat OLI от 23.06.2018 (path 175, row 24), в пределах которого были представлены все градации или классы нарушенности хвойных лесов. Для каждого лесного массива, находящегося в пределах спутниковой сцены, методом зональной статистики вычислили коэффициенты спектральной яркости в 6-ти спектральных зонах, соответствующих каналам 2-7 сенсора OLI. После этого полученные данные прошли статистический анализ.

Результаты. Применение предложенного подхода позволило достаточно точно выполнить картографирование участков нарушенных хвойных лесных экосистем на уровне детальности снимков Landsat (пример на рис. 2).

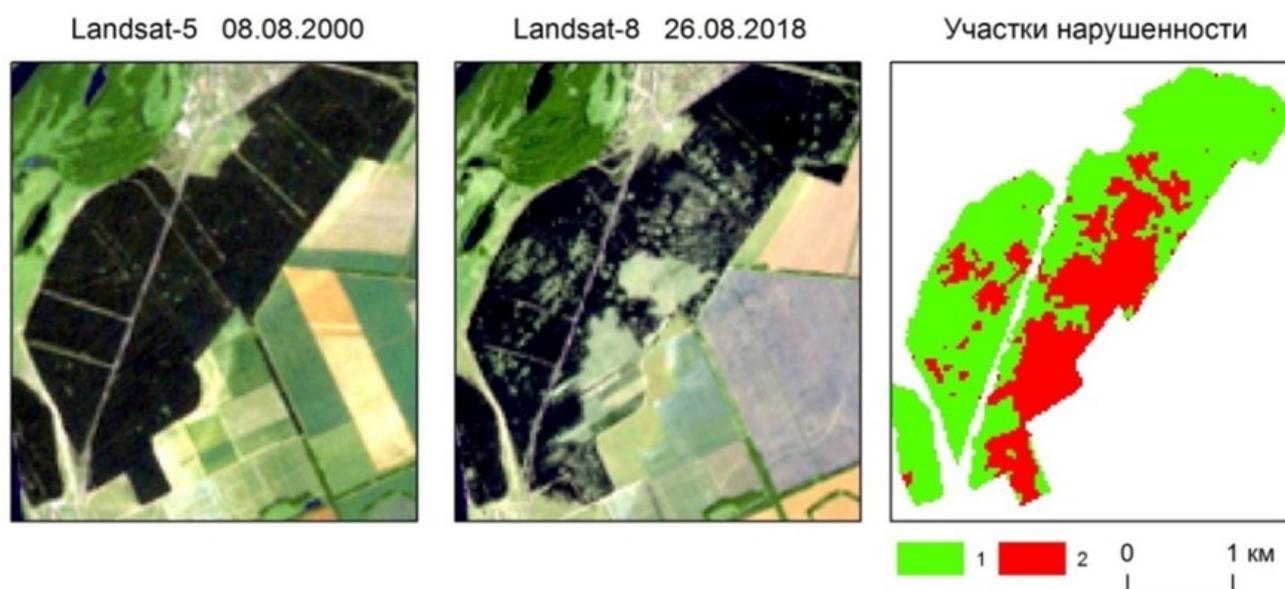


Рис. 2. Пример автоматизированного выявления участков хвойных лесных массивов, нарушенных в период 2000-2018 гг. (Воронежская область): 1 – леса без нарушений верхних ярусов, 2 – нарушенные леса

Для повышения достоверности полученная картограмма прошла визуальную проверку и корректировку методом ее последовательного сопоставления с разновременными снимками Landsat 2000 г. и 2018 г. на каждую спутниковую сцену (path/row).

Количественные данные (табл. 2), полученные на ее основе, показали, что в среднем по региону доля лесов с нарушениями верхних ярусов, появившимися в период 2000-2018 гг., составила 18,4 % в хвойных лесах и 8,6 % в смешанных лесных насаждениях. Наибольшая доля нарушенных хвойных лесов выявлена в Воронежской и Белгородской областях, т.е. на юге лесостепной зоны.

Таблица 2

Характеристики хвойных и смешанных с преобладанием хвойных лесов с нарушениями верхних ярусов, появившимися в 2000-2018 гг. на территории лесостепи Центрального Черноземья

Регион	Доля нарушенных лесов от общей лесной площади соответствующего породного состава, %		Доля от общей площади нарушенных лесов	
	Хвойные	Смешанные	Хвойные	Смешанные
Белгородская область	18,4	6,5	0,50	0,14
Воронежская область	25,0	15,6	0,47	0,40
Курская область	6,2	4,5	0,09	0,09
Липецкая область	9,7	12,9	0,05	0,66
Орловская область	1,9	3,4	0,05	0,45
Тамбовская область	3,2	6,4	0,01	0,82
Всего	18,4	8,6	0,22	0,54

Таким образом, доля нарушенных хвойных лесов оказалась достаточно высокой. Она обусловлена постепенным выпадением древостоя сосновых лесов во многих лесных массивах вследствие влияния болезней деревьев (рис. 2). В связи с этим происходит значительное изреживание верхних ярусов лесных насаждений. Другой причиной высокой нарушенности лесов являются лесные пожары 2010 года, от которых пострадали значительные участки хвойных лесных насаждений.

Из данных таблицы 2 видно, что хвойные и смешанные леса вносят основной вклад в общую площадь нарушенных лесов, составляя в ней суммарно 76 % (22 и 54 %). Такие результаты были получены с привлечением подготовленной нами картограммы всех нарушенных лесов региона в соответствующий период, характеризующей не только хвойные и смешанные, но и доминирующие в регионе широколиственные леса.

Характеризуя вклад хвойных лесов в общую площадь нарушенных лесных земель, необходимо отметить, что во всех областях, кроме Курской, хвойные леса и смешанные леса с преобладанием хвойных пород составили основную часть нарушенных лесных экосистем (см. табл. 2). Следует указать при этом, что на территории Курской области хвойные (сосновые) лесные насаждения распространены в наименьшей степени в сравнении с остальными исследуемыми регионами.

Высокая нарушенность хвойных лесов обусловлена их меньшей устойчивостью, по сравнению с лиственными лесами, к влиянию негативных факторов: в первую очередь, пожаров и болезней деревьев. Искусственное происхождение многих хвойных лесов, созданных на рубеже 1940-х – 1950-х гг. также может выступать причиной их более высокой подверженности негативным воздействиям.

Анализ хвойных лесов по доли нарушенных участков, присутствующих в них, показал (табл. 3), что лесные массивы с нарушенностью 0-10 % составляют суммарно 60 % от общей площади хвойных лесов. Леса с нарушенностью, не превышающей 25 %, составляют 74 % всех хвойных насаждений.

Таблица 3

Характеристики нарушенности хвойных лесных экосистем на территории лесостепи Центрального Черноземья в период 2000-2018 гг.

Доля нарушенных участков, %	Число лесных массивов	Доля от общей площади	Площадь, га
0-3	124	0,27	22819,9
4-10	84	0,33	28069,9
11-25	46	0,14	11730,7
26-50	30	0,15	12571,5
51-100	17	0,11	8826,3

Тем не менее, существенная площадь лесов с долей нарушенных участков более 25 % указывает на высокую нарушенность хвойных лесов в целом.

Оценка коэффициентов спектральной яркости хвойных насаждений с различной долей нарушенных лесных массивов, проведенная в шести диапазонах спектра на основе спутниковых данных 2018 года, показала (табл. 4), что в большинстве каналов Landsat-8 OLI наблюдается тенденция к увеличению отражательной способности по мере увеличения степени нарушенности лесных массивов.

Таблица 4

Коэффициенты спектральной яркости хвойных лесов с разной долей нарушенных лесных участков

Доля нарушенных участков, %	Зональные коэффициенты спектральной яркости					
	0,45-0,51 мкм	0,52-0,60 мкм	0,64-0,68 мкм	0,84-0,88 мкм	1,56-1,66 мкм	2,1-2,3 мкм
0-3	0,082	0,065	0,043	0,264	0,116	0,053
4-10	0,085	0,068	0,048	0,246	0,121	0,058
11-25	0,085	0,069	0,050	0,233	0,124	0,062
26-50	0,079	0,065	0,048	0,232	0,128	0,064
51-100	0,095	0,083	0,069	0,262	0,181	0,103

Наиболее четко эта тенденция выражена в средней инфракрасной области, соответствующей каналам 6, 7 сенсора Landsat OLI (1,56-1,66 мкм, 2,1-2,3 мкм), что подтверждает их наибольшую чувствительность к возникновению участков нарушенных лесных экосистем. В то же время проведенный анализ показал, что только участки с нарушенностью 51-100 % характеризуются статистически значимыми отличиями коэффициентов отражения от остальных категорий нарушенности лесных экосистем.

Выводы. На основе материалов разновременной многозональной спутниковой съемки 2000-2018 гг. с использованием автоматизированного подхода выполнено геоинформационное картографирование участков хвойных лесных экосистем с нарушениями верхних ярусов, появившихся в соответствующий период. Исследование проведено для территории лесостепной зоны Центрального Черноземья. На основе полученных данных установлено, что нарушенность древостоя хвойных лесов в соответствующий временной интервал составила 18,4 %. Нарушенность смешанных лесных насаждений с присутствием хвойных пород – 8,6 %. Суммарный вклад хвойных и смешанных с преобладанием хвойных насаждений в общую площадь нарушенных лесов составил 76 %. Основные причины нарушенности верхних ярусов хвойных лесных экосистем в регионе – воздействие болезней и лесные пожары. Лесные массивы с долей нарушенных участков более 25 % в хвойных лесах составляют более четверти от общей площади. В спектральных диапазонах 1,56-1,66 мкм, 2,1-2,3 мкм установлена тенденция к последовательному увеличению коэффициентов спектральной яркости по мере увеличения в лесных массивах доли нарушенных лесных участков.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-00049)

Библиографический список

1. Арманд Д.Л. Географическая среда и рациональное использование природных ресурсов / Д. Л. Арманд. – Москва: Наука, 1983.– 236 с.
2. Барталев, С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С. А. Барталев, В. А. Егоров, В. О. Жарко, Е. А. Лупян, Д. Е. Плотников, С. А. Хвостиков, Н. В. Шабанов. – Москва: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.
3. Бугаев, В.А. Дубравы лесостепи / В. А. Бугаев, А. Л. Мусиевский, В. Царалунга. – Воронеж: Воронежская государственная лесотехническая академия, 2013.– 247 с.

4. Воробьев, О.Н. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat / О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов, Ю. А. Полевщикова, С. А. Лежнин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 4. – С. 124-134.
5. Курбанов, Э.А. Оценка лесных гарей Чувашии методами дистанционного зондирования / Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, С. А. Лежнин // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 54. – С. 80-87.
6. 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: ПГТУ, 2015. – 131 с.
7. Потапов, П.В. Выявление и мониторинг дистанционными методами малонарушенных лесных территорий мира / П. В. Потапов, И. В. Журавлева, А. Е. Маниша, С. А. Турубанова, А. Ю. Ярошенко // Лесоведение. – 2008. – № 2. – С. 58-37.
8. Терехин, Э.А. Распознавание нарушенных лесных экосистем лесостепи на основе спектрально-отражательных характеристик / Э.А. Терехин // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 3. – С. 412-418.
9. Терехин, Э.А. Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок / Э.А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 112-124.
10. Чендев, Ю.Г. Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене / Ю.Г. Чендев. – Москва: ГЕОС, 2008. – 212 с.
11. Feng, M. Earth science data records of global forest cover and change: Assessment of accuracy in 1990, 2000, and 2005 epochs / M. Feng, J. O. Sexton, C. Huang, A. Anand, S. Channan, X.-P. Song, D.-X. Song, D.-H. Kim, P. Noojipady, J. R. Townshend // Remote Sensing of Environment – 2016. – Vol. 184 – P. 73-85.
12. Hansen, M.C. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change / M. C. Hansen, P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, J. R. G. Townshend // Science. – 2013. – Vol. 342, № 6160. – P. 850-853.
13. Healey, S. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection / S. Healey, W. Cohen, Y. Zhiqiang, O. Krankina // Remote Sensing of Environment. – 2005. – Vol. 97, № 3. – P. 301-310.
14. Kim, D.-H. Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000 / D.-H. Kim, J. O. Sexton, P. Noojipady, C. Huang, A. Anand, S. Channan, M. Feng, J. R. Townshend // Remote Sensing of Environment. – 2014. – Vol. 155. – P. 178-193.
15. Potapov, P.V. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive / P. V. Potapov, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, A. M. Krylov, J. L. McCarty, V. C. Radeloff, M. C. Hansen // Remote Sensing of Environment. – 2015. – Vol. 159. – P. 28-43.
16. White, J.C. A nationwide annual characterization of 25years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series / J. C. White, M. A. Wulder, T. Hermosilla, N. C. Coops, G. W. Hobart // Remote Sensing of Environment. – 2017. – Vol. 194. – P. 303-321.

References

1. Armand D.L. Geograficheskaya sreda i ratsional'noe ispol'zovanie prirodnykh resursov [Geographical environment and rational use of natural resources], Moscow, 1983, 236 p.
2. Bartalev S.A., Egorov V. A., Zharko V. O., Lupyay E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V. Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii [Land cover mapping over Russia using Earth observation data], Moscow, 2016, 208 p.
3. Bugaev V.A., Musievskii A. L., Tsaralunga V. Dubravy lesostepi [Oak forests of the forest-steppe zone], Voronez, 2013, 247 p.
4. Vorob'ev O.N., Kurbanov E. A., Polevshchikova Yu. A., Lezhnin S. A. Otsenka dinamiki i narushennosti lesnogo pokrova v srednem povolzh'e po snimkam landsat [Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 124-134.
5. Kurbanov E.A., Vorob'ev O. N., Lezhnin S. A. Otsenka lesnykh garei Chuvashii metodami distantsionnogo zondirovaniya [Assessment of burnt-out forest of Chuvashia by remote sensing method], *Vestnik Irkutskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii* [Bulletin of the Irkutsk State Agricultural Academy], 2013, No. 54, pp.80–87.
6. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Lezhnin S.A., Gubaev A.V., Polevshchikova Yu.A. Tematicheskoe kartirovaniye rastitel'nogo pokrova po sputnikovym snimkam: validatsiya i otsenka tochnosti [Thematic mapping of vegetation by satellite imagery: validation and accuracy assessment]: monografiya, Yoshkar-Ola, 2015, 131 p.
7. Potapov P.V., Zhuravleva I. V., Manisha A. E., Turubanova S. A., Yaroshenko A. Yu., Vyyavlenie i monitoring distantsionnymi metodami malonarushennykh lesnykh territorii mira [Identification and monitoring of world intact landscapes using remote sensing methods], *Lesovedenie* [Forest science], 2008, N. 2, pp. 58-37.
8. Terekhin E.A. Raspoznavaniye narushennykh lesnykh ekosistem lesostepi na osnove spektral'no-otrazhatel'nykh kharakteristik [Detection of disturbed forest ecosystems in the forest-steppe zone using reflectance values], *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], 2019, Vol. 43, N. 3, pp.412-418.
9. Terekhin E.A. Otsenka narushennosti lesnykh ekosistem yugo-zapada Srednerusskoi vozvyshehnosti s primeneniem materialov kosmicheskikh s"emok [Estimation of forest ecosystems disturbance in the southwest of Central Russian

- Upland using remote sensing data], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2017, Vol. 14, N. 4, pp.112-124.
10. Chendev Yu.G. Evolyutsiya lesostepnykh pochv Srednerusskoi vozvyshechnosti v golotsene [Evolution of forest-steppe soils of the Central Russian Upland in the Holocene], Moscow, 2008, 212 p.
 11. Feng M., Sexton J. O., Huang C., Anand A., Channan S., Song X.-P., Song D.-X., Kim D.-H., Noojipady P., Townshend J. R. Earth science data records of global forest cover and change: Assessment of accuracy in 1990, 2000, and 2005 epochs, *Remote Sensing of Environment*, 2016. Vol. 184, pp. 73-85.
 12. Hansen M.C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J. , Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 34, N. 6160, pp. 850-853.
 13. Healey S., Cohen W., Zhiqiang Y., Krankina O. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 97, No. 3, pp. 301-310.
 14. Kim D.-H., Sexton J. O., Noojipady P., Huang C., Anand A., Channan S., Feng M., Townshend J. R. Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 155, pp. 178-193.
 15. Potapov P.V., Turubanova S. A., Tyukavina A., Krylov A. M., McCarty J. L., Radeloff V. C., Hansen M. C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 159, pp. 28-43.
 16. White J.C., Wulder M. A., Hermosilla T., Coops N. C., Hobart G. W. A nationwide annual characterization of 25years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 194, pp. 303-321.

РОСТ И РАЗВИТИЕ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В КОНТЕЙНЕРАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СУБСТРАТОВ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ СЛОЖЕНИЯ

Д. И. Мухортов, А. В. Антропова

Поволжский государственный технологический университет

В статье изложены результаты работ по изучению агрофизических свойств различных корнезакрывающих субстратов, проанализировано их влияние на рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной, выращиваемой в контейнерах в качестве посадочного материала для лесовосстановительных работ. Лесовосстановление посадочным материалом с закрытой корневой системой имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными технологиями. Однако данная технология требует решения некоторых задач с целью оптимизации процессов выращивания сеянцев. Одним из проблемных моментов является выбор оптимальных по своим как агрохимическим, так и агрофизическим свойствам субстратов. В настоящее время большое внимание уделяется химической составляющей корнезакрывающих субстратов, когда агрофизические свойства учитываются в меньшей степени, но именно эти свойства субстратов изначально определяют характер развития корневой системы сеянцев, а следовательно, и всей вегетативной части растения. Химическая составляющая может меняться в процессе выращивания посадочного материала путем внесения удобрений. Агрофизические же свойства поменять в процессе выращивания невозможно без непосредственного вмешательства, что негативно скажется на самом росте растений, поэтому следует изначально придерживаться рекомендуемых агрофизических свойств субстрата, которые позволят получить высококачественный посадочный материал. Наши исследования направлены на определение влияния плотности сложения субстрата на развитие сеянцев сосны обыкновенной. Для этого были изучены варианты субстратов на основе верхового торфа, в которых выращены сеянцы сосны обыкновенной. Плотность сложения определялась с помощью оборудования «Стереопикнметр». По результатам исследований можно сделать вывод, что наиболее оптимальные показатели плотности сложения субстрата в контейнерах, которые дали наилучшие результаты по биометрическим параметрам самих сеянцев, находятся в диапазоне 0,10-0,17 г/см³.

Ключевые слова: плотность сложения субстрата, корнезакрывающий субстрат, лесовосстановление, закрытая корневая система, посадочный материал, агрофизические свойства субстрата.

GROWTH AND DEVELOPMENT OF THE CONTAINERIZED SEEDLINGS OF SCOTS PINE USING THE SUBSTRATES OF VARIOUS BULK DENSITY

D. I. Mukhortov, A. V. Antropova

Volga State University of Technology

The article describes the research results into agrophysical properties of various root covering substrates, their influence on the growth and development of the containerized Scots pine seedlings as a planting stock for reforestation. This method has a number of advantages in comparison with the traditional planting method. However, it requires overcoming certain problems in order to optimize the processes of seedlings growing. One of the problems is the choice of substrate optimal in agrochemical and agrophysical properties. Nowadays, the chemical components of root covering substrates are of vital importance unlike the agrophysical properties, which are considered to a lesser extent. However, these are the agrophysical properties of substrates, which determine the development of seedling root system and, therefore, all the vegetative part of a plant. The chemical component can change while growing the planting stock by means of fertilizers application. The agrophysical properties can't be changed without the immediate intervention that will negatively affect the growth of plants. Therefore, it is necessary to adhere to the initially recommended ag-

rophysical properties of substrate, which will make it possible to grow a high-quality planting stock. The research aims to define the influence of bulk density of substrate on the development of Scots pine seedlings. For this purpose different substrates based on bog peat have been examined, the seedlings of Scots pine have been grown in these substrates. Bulk density of substrates was calculated with "Stereopeakmeter". The carried out research has proved that the most optimal indicators of bulk density of substrate in containers that showed the best results on biometric parameters of seedlings were varying between 0.10 and 0.17 g/cm³.

Key words: *bulk density of substrate, root covering substrate, reforestation, root-balled tree system, planting stock, agrophysical properties of substrate.*

Введение. Решение ключевых проблем лесовосстановления, повышения качества работ и эффективности лесокультурного производства возможно только на основе комплексной механизации и автоматизации всего многоротационного процесса создания лесных культур – от посева семян при выращивании посадочного материала до формирования насаждения. Такую возможность в перспективе обеспечивает технология выращивания и использования посадочного материала с закрытой корневой системой, которая отличается сравнительно высоким уровнем механизации и автоматизации процессов выращивания посадочного материала, его транспортировки на лесокультурную площадь и посадки; увеличивает период посадки растений в лесу; повышает приживаемость посадочного материала.

Отечественные и зарубежные разработки в этой области, начатые в конце 50-х годов прошлого века, подтверждают **актуальность данного направления** в развитии лесокультурного производства как в лесоводственно-экономическом, так и в социальном плане (Жигунов, 1995; Родин, 2010; Романов, 2007). Однако широкое применение посадочного материала с закрытой корневой системой в России задерживается, что во многом объясняется отсутствием научно обоснованных рекомендаций по его выращиванию и использованию применительно к конкретным видам деревьев и условиям регионов.

В настоящее время определение оптимального вида субстрата для выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой осуществляется по его биохимическому составу, однако влияние на первые годы развития сеянцев данные свойства субстрата не оказывают. Более существенная взаимосвязь роста и развития посадочного материала от типа субстрата наблюдается при его различиях по гранулометрическому составу и водно-физическим свойствам.

Исследования по определению оптимальных водно-физических свойств субстратов для выращивания посадочного материала древесных растений в контейнерах будут способствовать разработке технологии производства субстратов, в том числе с применением торфа местных предприятий и внесением различных органических отходов, что позволит сократить необходимые ранее расходы на приобретение и транспортировку субстратов из других регионов.

Исследования, направленные на улучшение агрохимических и агрофизических свойств субстрата для выращивания посадочного материала хвойных пород, проводятся как за рубежом, так и в России. Изучаются способы улучшения структуры корнезакрывающих субстратов, путем применения различных по соотношению составляющих, изменением гранулометрического состава. Проводятся исследования по использованию гранулированного биочара (Dumroese et al., 2011), где отмечается его положительное воздействие на влагоудерживающую способность субстрата в связи с переработкой биочара в гранулы.

Изучается эффективность применения гидрогеля для сохранения влажности корнезакрывающего субстрата (Sarvas et al., 2007), использования в качестве одного из составляющих измельченной коры сосны (Jackson et al., 2009; Зайцева, 2010).

Согласно результатам исследований, корнезакрывающий субстрат должен обладать высокой влагоемкостью, хорошей смачиваемостью, малой насыпной плотностью, достаточной аэрируемостью, буферностью, высокой сорбционной способностью, иметь адекватное воздушное пространство и водоудерживающую способность в течение всего периода выращивания (Fukushima et al., 2009). Существует ряд рекомендаций, которых следует придерживаться при выращивании сеянцев хвойных пород в контейнерах: после полива воздухопроницаемость субстрата должна быть равна 10–30 %, влагоудерживающая способность находится в пределах 45–65 % при насыпной плотности 0,19–0,70 г/см³ (Yeager et al. 2007). Эти свойства меняются в процессе выращивания: происходит оседание частиц, что приводит к уменьшению воздухопроницаемости (Allaire-Leung, 1999).

Проводились эксперименты с целью определения оптимальных альтернативных торфяных субстратов. Изучены физические свойства древесно-волоконистых субстратов по сравнению с другими органическими субстратами. Были определены объемный вес, пористость, влагоемкость, водозадерживающие свойства и доля потери объема этих субстратов. Древесно-волоконистые субстраты показали такой же объемный вес и общее поровое пространство, что и торфяные субстраты, но с меньшим влагоудержанием. Увеличение объемного веса вызвало уменьшение плотности сложения субстрата. По результатам исследований рекомендуется уплотнение субстратов из древесного волокна в контейнерах, чтобы минимизировать оседание субстрата (Gruda, Schnitzler, 2004).

Водно-физические свойства субстратов также изучались на кокосовом субстрате, в частности в зависимости от размера частиц. Размер частиц значительно влияет на физические свойства субстрата, особенно на воздухопроницаемость и влагоудерживающее свойство. Пористость субстрата увеличивается, а влагоудерживающая способность уменьшается с увеличением диаметра частиц. Наиболее оптимальным субстрат является во фракции 0,125–0,25 мм. Размер частиц, эквивалентный 0,5 мм, приводит к незначительному изменению изученных физических свойств. Размер частиц пыли кокосовой коры также влияет на физико-химические и химические характеристики, но в меньшей степени (Noguera et al., 2003).

Поиск оптимальных водно-физических свойств субстрата для древесных пород продолжается по настоящее время, что связано с появлением на рынке новых альтернативных традиционным видам продуктов, которые требуют исследования.

Цель исследований – определение оптимальных агрофизических свойств субстратов для выращивания однолетних сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в контейнерах.

Задачи исследований:

1. Оценить степень влияния агрофизических и агрохимических свойств субстратов на рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной в контейнерах.
2. Определить влияние введения агроперлита на агрофизические и агрохимические свойства субстратов, на рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной в контейнерах.
3. Выявить зависимость влияния хранения субстрата на его агрофизические свойства, а также на рост и развитие сеянцев.
4. Изучить взаимосвязь биометрических показателей сеянцев сосны обыкновенной от водно-физических свойств используемых корнезакрывающих субстратов.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились с 25 июня по 10 октября 2018 года на территории Ботанического сада-института Поволжского государственного технологического университета с использованием оборудования ЦКП «ЭБЭЭ». Опыты закладывались в теплице арочного типа с поликарбонатным покрытием и наличием автоматизированной поливной системы. Посев се-

мян, предварительно протравленных «Байлетоном» (4 г препарата на 1 кг семян), производился вручную в контейнеры «Ардатов-40» на субстраты с разными физико-химическими свойствами. В эксперимент были включены десять вариантов опыта:

- 1) ЗАО «Росторфинвест», «грунты торфяные универсальные «Агробалт», марка «Агробалт-Н» без перлита;
- 2) ЗАО «Росторфинвест», «грунты торфяные универсальные «Агробалт», марка «Агробалт-С» 20% перлита;
- 3) ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт 5СО/1/3 (2017 года изготовления);
- 4) ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт 19С/1 (2017 года изготовления);
- 5) ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт 19С/1/5,2 (2016 года изготовления);
- 6) ОАО «Параньгинское торфопредприятие», переходный торф (1 года хранения);
- 7) ОАО «Параньгинское торфопредприятие», переходный торф (без хранения);
- 8) ЗАО «Ронгинское торфобрикетное предприятие», низинный торф;
- 9) Субстрат Семеновского спецсемлесхоза Нижегородской области;
- 10) ЗАО «Ронгинское торфобрикетное предприятие», переходный торф.

Для каждого варианта субстрата были определены физико-химические свойства.

Результаты исследования и их обсуждение. Химические свойства субстратов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Агрохимические свойства исследуемых субстратов

№ п/п	Наименование субстрата	Орг. в-во, %	pH _{KCl}	P ₂ O ₅ , мг	K ₂ O, мг	N _{нитрат.} , мг
1	ЗАО «Росторфинвест», «грунты торфяные универсальные «Агробалт», марка «Агробалт-Н» без перлита	94,66	6,87	1,6	34,9	4,8
2	ЗАО «Росторфинвест», «грунты торфяные универсальные «Агробалт», марка «Агробалт-С» 20% перлита	85,38	6,92	62,3	119	517
3	ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт 5СО/1/3 (2017 года изготовления)	80,08	6,92	257,3	270,8	683,7
4	ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт (2017 года изготовления)	95,1	4,73	138,6	275,6	189,2
5	ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт 19С/1/5,2 (2016 года изготовления)	89,04	5,89	138,5	303,2	62,6
6	ОАО «Параньгинское торфопредприятие», переходный торф (1 года хранения)	84,61	6,94	15,4	10,3	658,2
7	ОАО «Параньгинское торфопредприятие», переходный торф (без хранения)	89,16	6,97	13,2	8,2	665
8	ЗАО «Ронгинское торфобрикетное предприятие», низинный торф	6,21	7,35	550	100	559,5
9	Субстрат Семеновского спецсемлесхоза Нижегородской области	84,2	6,87	3,9	8,2	11,2
10	ЗАО «Ронгинское торфобрикетное предприятие», переходный торф	89,46	4,87	15,3	198,5	33,6

Согласно результатам анализа химического состава субстратов, все варианты, кроме низинного торфа (№9), имеют высокое содержание органических веществ – от 80 до 95 %. Содержание минеральных веществ находится в зависимости от исходного рецепта субстрата и срока его хранения и представлено в таблице 1. Следует отметить, что согласно проведен-

ным ранее исследованиям, органическое и минеральное составляющее почвенного субстрата не оказывает существенного влияние на рост и развитие сеянцев, выращенных в контейнерах, что подтвердилось и в наших исследованиях.

Физические свойства субстратов в ходе эксперимента определялись с помощью стереопикнометра. К общим физическим свойствам относятся плотность почвы, плотность твердой фазы и пористость (табл. 2).

Таблица 2

Агрофизические свойства исследуемых субстратов

№ п/п	Наименование субстрата	Плотность сложения, г/см ³	Объем порошка, см ³	Плотность сложения субстрата, г/см ³	Пористость субстрата, %
1	ЗАО «Росторфинвест», «грунты торфяные универсальные «Агробалт», марка «Агробалт-Н» без перлита	0,073	3,745	1,175	93,8
2	ЗАО «Росторфинвест», «грунты торфяные универсальные «Агробалт», марка «Агробалт-С» 20% перлита	0,162	7,492	1,295	87,5
3	ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт 5С0/1/3 (2017 года изготовления)	0,120	6,215	1,158	89,6
4	ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт (2017 года изготовления)	0,180	8,217	1,314	86,3
5	ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт 19С/1/5,2 (2016 года изготовления)	0,195	8,344	1,402	86,1
6	ОАО «Параньгинское торфопредприятие», переходный торф (1 года хранения)	0,290	11,098	1,568	81,5
7	ОАО «Параньгинское торфопредприятие», переходный торф (без хранения)	0,332	12,770	1,558	78,7
8	ЗАО «Ронгинское торфобрикетное предприятие», низинный торф	0,337	13,711	1,473	77,1
9	Субстрат Семеновского спецсемлесхоза Нижегородской области	0,353	13,769	1,540	77,1
10	ЗАО «Ронгинское торфобрикетное предприятие», переходный торф	0,197	8,623	1,368	85,6

Очевидно, что в исследуемых вариантах плотность сложения субстрата варьирует от 0,073 до 0,353 г/см³. Наименьшее значение наблюдается у марки «Агробалт-Н» без перлита (ЗАО «Росторфинвест»). Наибольшей плотностью характеризуются субстрат из Семеновского спецсемлесхоза – 0,353 г/см³, низинный торф ЗАО «Ронгинское торфобрикетное предприятие» – 0,337 г/см³ и питательные торфяные субстраты из переходного торфа ОАО «Параньгинское торфопредприятие» (0,290-0,332 г/см³).

Плотность сложения субстрата так же оказывает значительное влияние на формирование корневой системы сеянцев, определяя динамику их роста и развития. Сложение субстрата определяется взаимным расположением ее частиц и комков.

Плотность почв зависит от минералогического, механического состава, а также от содержания в ней органических веществ, ее структурности, сложения и механической обработки, а плотность твердой фазы почв — от минералогического состава и содержания органических веществ.

Наименьшую плотность твердой фазы имеет торфяной субстрат марки «Агробалт-Н» без перлита (ЗАО «Росторфинвест») – 1,175 г/см³. Максимальные значения наблюдаются в переходных торфах ОАО «Параньгинское торфопредприятие» 2016 и 2017 годов – 1,568 и 1,558 г/см³ и в субстрате Семеновского спецсемлесхоза – 1,540 г/см³.

С общей пористостью связаны водо-, воздухопроницаемость и воздухоемкость, газообмен между почвой и атмосферой. Показатели пористости изучаемых субстратов варьируют от

77 % (низинный торф, субстрат Семеновского спецсемлесхоза) до 95 % («Агробалт-Н» без перлита (ЗАО «Росторфинвест»)).

Каждый вариант эксперимента состоял из трех повторностей. За одну повторность в каждом варианте принималось два контейнера «Ардатов-40» с 40 ячейками. В каждую ячейку контейнера высевалось по одному семени сосны обыкновенной, всего было взято 2 640 семян. Варианты опыта находились в одинаковых условиях по отношению к факторам окружающей среды.

Уход за сеянцами заключался в регулярных поливах (один раз в день), прополке (один раз в неделю). Для борьбы с болезнями и для профилактики грибковых заболеваний проводили опрыскивание раствором марганцовокислого калия, норма внесения 4 мг на 10 л воды.

Сохранность сеянцев находится в пределах 67,5-83,2%. Наименьшая доля сохранившегося посадочного материала наблюдается на верховом торфе ООО «Велторф» 2016 года (67,5 %) и в субстрате Семеновского спецсемлесхоза Нижегородской области (71,7 %). Наибольшее число сохранности характерно для субстрата ЗАО «Росторфинвест» марки «Агробалт-С» с 20 % содержанием перлита и для переходного торфа ОАО «Параньгинское торфопредприятие» 2016 года закупки – 89,2 %.

По окончании эксперимента сеянцы вынимались из контейнеров, отмывались, измерялись их биометрические параметры, представленные в таблице 3. Линейные размеры сеянцев определялись методом простых измерений высоты стволика и длины корня с помощью линейки, диаметр шейки корня – с помощью штангенциркуля. Масса сухого вещества органов сеянцев взвешивалась с помощью электронных весов. Отдельно определялась масса стволиков, хвои, крупных корней (диаметром более 1мм), мелких корней (диаметром менее 1 мм). Биомасса пересчитывалась на 100 штук сеянцев.

Таблица 3

Биометрические параметры сеянцев сосны обыкновенной, выращенной в контейнерах

Наименование субстрата	Диаметр корневой шейки, мм	Длина, см					Масса сухого вещества, г/100 шт			
		надземной части корневой системы	общая	хвои	стволиков	надземной части корней	общая			
ЗАО «Росторфинвест», «грунты торфяные универсальные «Агробалт», марка «Агробалт-Н» без перлита	1,4	6,8	15,0	21,8	28,2	5,8	34,0	13,0	47,0	
ЗАО «Росторфинвест», «грунты торфяные универсальные «Агробалт», марка «Агробалт-С» 20% перлита	1,4	8,6	18,1	26,7	22,0	6,2	28,2	13,5	41,7	
ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт 5СО/1/3 (2017 года изготовления)	1,6	7,6	9,9	17,5	31,1	8,0	39,1	19,5	58,6	
ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт (2017 года изготовления)	1,1	5,8	10,9	16,7	17,4	4,5	21,9	10,5	32,5	
ООО «Велторф», торфяной питательный субстрат (верховой), рецепт 19С/1/5,2 (2016 года изготовления)	1,0	5,9	13,5	19,4	10,6	3,1	13,7	6,7	20,3	
ОАО «Параньгинское торфопредприятие», переходный торф (1 года хранения)	1,1	6,4	12,7	19,1	12,9	3,5	16,3	6,7	23,1	
ОАО «Параньгинское торфопредприятие», переходный торф (без хранения)	1,0	5,8	7,6	13,4	10,8	2,7	13,5	5,0	18,5	
ЗАО «Ронгинское торфобрикетное предприятие», низинный торф	0,9	5,8	8,2	14,0	12,4	2,5	14,9	5,7	20,5	
Субстрат Семеновского спецсемлесхоза Нижегородской области	0,5	3,4	9,9	13,3	6,0	1,5	7,5	2,6	10,1	
ЗАО «Ронгинское торфобрикетное предприятие», переходный торф	1,0	6,2	8,7	14,9	4,9	1,1	2,4	8,4	11,9	

По результатам измерений биометрических параметров семян сосны обыкновенной была проведена оценка влияния на рост и развитие посадочного материала агрохимических и агрофизических свойств субстрата.

Оценка степени влияния агрофизических и агрохимических свойств субстрата на рост и развитие семян проводилась с помощью корреляционного анализа, результаты которого представлены в таблице 4.

Таблица 4

Корреляционный анализ биометрических параметров семян и свойств субстрата

Свойства субстратов		Биометрические параметры семян	Диаметр корневой шейки, мм	Длина, см			Масса сухого вещества, г/100 шт			
				надземной части	корневой системы	общая	хвой	стволовиков	корней	общая
Агрофизические	Плотность сложения субстрата, г/см ³	-0,84	-0,66	-0,56	-0,65	-0,74	-0,72	-0,74	-0,75	
	Плотность твердой фазы, г/см ³	-0,82	-0,61	-0,41	-0,51	-0,82	-0,78	-0,82	-0,82	
Агрохимические	Содержание орг. в-ва, %	0,24	0,08	0,35	0,30	0,11	0,19	0,15	0,14	
	pH KCl	0,10	0,12	0,11	0,12	0,29	0,24	0,19	0,25	
	P ₂ O ₅ , мг	0,01	0,06	-0,31	-0,23	0,13	0,10	0,16	0,14	
	K ₂ O, мг	0,30	0,24	0,02	0,09	0,18	0,27	0,35	0,25	
	N нитрат., мг	0,32	0,44	-0,14	0,03	0,27	0,35	0,33	0,30	

Согласно данным таблицы 4, агрохимические свойства используемых субстратов слабо влияют на рост и развитие семян сосны обыкновенной, так как коэффициент корреляции не превышает 0,35. Агрофизические свойства субстратов оказывают умеренное и сильное влияние на рост и развитие растений. Обратная связь говорит о том, что с уменьшением плотности субстрата значения биометрических параметров семян увеличиваются, тем самым увеличивая долю выхода стандартных семян. Наибольшее влияние оказывается на диаметр корневой шейки и массу сухого вещества семян ($R^2=0,72-0,84$). Длина корневой системы имеет наименьшую зависимость от агрофизических свойств субстрата ($R^2=0,41-0,56$), так как ее размеры ограничены параметрами ячеек контейнера.

Следовательно, наибольшее влияние на процесс формирования стандартных семян оказывают агрофизические свойства субстратов, которые зависят от составляющих рецепта компонентов. На рынке субстратов встречаются различные рецепты: с включением и без включения в состав агроперлита. Использование перлита в качестве компонента субстрата (до 40 %) позволяет значительно улучшить характеристики смеси. Повышаются пористость и рыхлость, а значит, и воздухопроницаемость, предотвращается слеживание, комкование, уплотнение, затвердевание почвы, образование поверхностной корки. Результаты проведенного эксперимента по выявлению зависимости введения агроперлита на физические и химические свойства субстратов на рост и развитие семян показали, что включение в состав субстратов перлита оказывает влияние только на линейные параметры семян (табл. 5).

**Влияние введения в субстрат агроперлита на биометрические параметры
контейнерных сеянцев сосны обыкновенной ($t_{\text{табл.}}=1,96$)**

Наименование параметры		Наименование субстрата	ЗАО «Росторфинвест», «грунты торфяные универсальные «Агробалт», марка «Агробалт-Н» без перлита	ЗАО «Росторфинвест», «грунты торфяные универсальные «Агробалт», марка «Агробалт-С» 20% без перлита
Диаметр корневой шейки, см		$X_{\text{ср}}$	1,4	1,36
		m_x	0,03	0,02
		$t_{\text{факт}}$	1,32	
Высота, см		$X_{\text{ср}}$	6,8	8,6
		m_x	0,11	0,78
		$t_{\text{факт}}$	2,29	
Длина корня, см		$X_{\text{ср}}$	15	18,1
		m_x	0,47	1,2
		$t_{\text{факт}}$	2,42	
Масса хвои, г		$X_{\text{ср}}$	21,41	16,97
		m_x	7,08	5,26
		$t_{\text{факт}}$	0,94	
Масса стволика, г		$X_{\text{ср}}$	5,81	6,24
		m_x	0,48	0,56
		$t_{\text{факт}}$	0,59	
Масса корней, г		$X_{\text{ср}}$	13,02	13,5
		m_x	2,37	1,22
		$t_{\text{факт}}$	0,18	

Согласно данным таблицы 5, увеличение показателей высота стволиков и длины корневой системы контейнерных сеянцев сосны обыкновенной при введении в используемый субстрат 20 % агроперлита достоверно, так как $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл.}}$. Влияние использования агроперлита в субстрате на изменение массы сухого вещества не достоверно, так как $t_{\text{факт}}$ не превышает $t_{\text{табл.}}$.

Следует также отметить, что введение агроперлита в субстрат оказывает влияние на изменение агрофизических свойств почвы. С увеличением доли агроперлита на 20 % плотность сложения субстрата увеличивается на 55 %, плотность твердой фазы – на 9 %, что связано с задержкой воды в субстрате.

Таким образом, из результатов сравнения биометрических параметров сеянцев, выращенных в субстратах с разным содержанием агроперлита, следует, что роль введения агроперлита наблюдается только при формировании длины корневой системы и высоты сеянца. Однако для более достоверного определения влияния на рост и развитие сеянцев агроперлита необходимо провести эксперименты по выращиванию посадочного материала различных древесных видов с включением в состав субстратов разной доли агроперлита.

Одной из проблем производства посадочного материала в контейнерах является применение разного по составу и сроку хранения субстратов, которые будут способствовать увеличению выхода стандартных сеянцев. Процесс хранения субстрата в первую очередь оказывает существенное влияние на изменение агрохимического состава, а также способствует изменению агрофизических свойств.

В ходе эксперимента были изучены сеянцы, выращенные в контейнерах с применением идентичного по составу переходного торфа ОАО «Параньгинское торфопредприятие» со сроком хранения 1 год и без хранения.

По результатам измерения биометрических параметров видно, что сеянцы, выращенные на прошлогоднем субстрате, имеют показатели выше, чем на свежем торфе (табл. 6.).

Влияние хранения субстрата на линейные показатели контейнерных семян сосны обыкновенной
($t_{\text{табл}} = 1,96$)

Параметры	Наименование субстрата	ОАО «Параньгинское торфопредприятие», переходный торф (1 года хранения)	ОАО «Параньгинское торфопредприятие», переходный торф (без хранения)
		Диаметр корневой шейки, см	X _{ср}
	m _x	0,02	0,01
	t _{факт}	4,92	
Высота, см	X _{ср}	6,44	5,84
	m _x	0,1	0,08
	t _{факт}	4,69	
Длина корня, см	X _{ср}	12,66	7,63
	m _x	0,36	0,33
	t _{факт}	10,3	
Масса хвои, г	X _{ср}	12,88	10,8
	m _x	1,18	0,66
	t _{факт}	1,54	
Масса стволика, г	X _{ср}	3,46	2,7
	m _x	0,22	0,35
	t _{факт}	1,84	
Масса корней, г	X _{ср}	6,72	5,03
	m _x	0,54	0,23
	t _{факт}	1,95	

Согласно данным, представленным в таблице 6, увеличение линейных параметров семян при использовании субстрата с 1 годом хранения, по сравнению со свежим, достоверно, так как $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$. Показатели, наблюдаемые в изменении массы сухого вещества семян, можно считать недостоверными, так как $t_{\text{факт}}$ не превышает $t_{\text{теорет}}$.

На плотность сложения и плотность твердой фазы 1 год хранения не оказал существенного влияния. Через год хранения плотность сложения субстрата уменьшилась на 12,6 %, изменение в плотности твердой фазы наблюдается в сторону увеличения на 0,6 %.

Следовательно, один год хранения не способствует существенным изменениям агрофизических свойств субстрата, но оказывает влияние на изменение биометрических параметров семян, в частности на торфе с 1 годом хранения растения имеют более высокие показатели роста. Однако для получения более точного результата следует провести эксперименты с использованием субстратов разного срока хранения и отследить динамику изменения их агрофизических свойств.

Как было отмечено выше, агрофизические свойства субстратов оказывают существенное влияние на рост и развитие посадочного материала, выращиваемого в контейнерах. По результатам исследований биометрических параметров семян, полученных на 10 испытываемых вариантах субстрата, были построены модели для определения наиболее оптимальных водно-физических свойств корнезакрывающих субстратов. Моделирование зависимости роста семян сосны обыкновенной при использовании субстратов с различными агрофизическими свойствами проводилось с применением частной функции отклика растений вида

$$y = a \cdot x^{(b-1)} \cdot \exp(-c \cdot x)^b + c \quad (1)$$

График зависимости массы надземной части семян от плотности сложения субстрата представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Зависимость показателей массы надземной части сеянцев сосны обыкновенной от плотности сложения субстрата

По максимальным показателям суммы масс сухого вещества хвои и стволиков сеянцев установлено, что наиболее оптимальное значение плотности сложения субстрата в исходной смеси колеблется в пределах 0,05...0,07 г/см³.

Зависимость массы подземной части сеянцев от плотности сложения субстрата отражена на графике, представленном на рисунке 2.

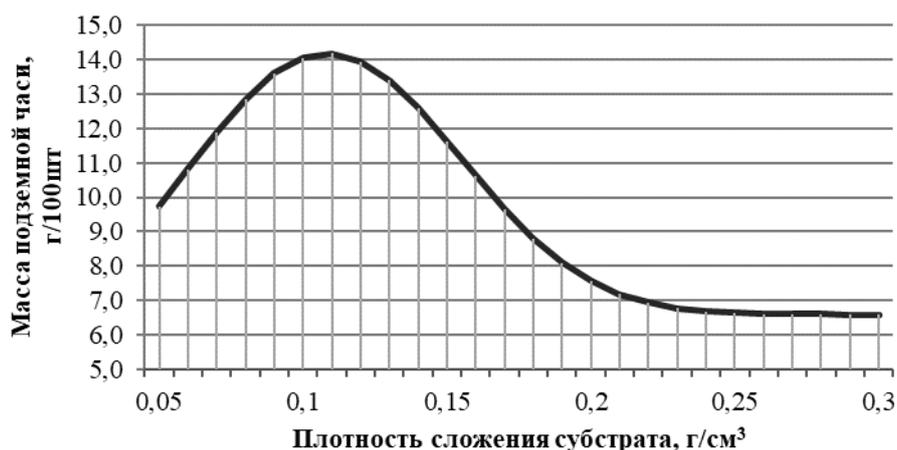


Рис. 2. Зависимость показателей массы подземной части сеянцев сосны обыкновенной от плотности сложения субстрата

Согласно графику зависимости массы корневой системы сеянцев от массы сухого вещества подземной части наибольшее значение оказывается при плотности сложения субстрата 0,10...0,12 г/см³. Максимальное значение массы надземной части наблюдается в пределах плотности твердой фазы 1,20...1,25 г/см³.

Заключение

Таким образом, результаты исследований подтвердили, что на рост и развитие посадочного материала сосны обыкновенной с закрытой корневой системой в большей степени оказывают влияние агрофизические свойства субстрата, чем его агрохимические свойства. Регрессионный анализ зависимости биометрических параметров сеянцев от водно-физических свойств субстрата выявил обратную связь влияния массы сухого вещества от плотности. Наибольшее влияние плотность сложения субстрата оказывает на диаметр корневой шейки и массу сухого вещества сеянцев ($R^2=0,72...0,84$).

Параметры сеянцев, выращенных без включения агроперлита, характеризуются меньшими биометрическими параметрами, в отличие от сеянцев, полученных на рецепте с содержа-

нием 20% агроперлита. Однако введение в состав субстрата агроперлита показывает достоверное влияние только на линейные параметры сеянцев. Влияние использования агроперлита в субстрате на изменение массы сухого вещества не достоверно, так как $t_{\text{факт.}}$ не превышает $t_{\text{табл.}}$

Введение агроперлита в субстрат оказывает влияние на изменение его агрофизических свойств. С увеличением доли агроперлита плотность сложения субстрата увеличивается на 55 %, плотность твердой фазы – на 9 %, что связано с повышением водоудерживающей способности субстрата. Тем не менее, для более достоверного определения влияния на рост и развитие сеянцев агроперлита следует провести эксперименты по выращиванию посадочного материала различных древесных видов с включением в состав субстратов разной доли агроперлита.

По результатам исследований установлено, что на рост и развитие сеянцев в контейнерах оказывает влияние срок хранения субстрата. Было выявлено, что на переходном торфе ОАО «Параньгинское торфопредприятие» со сроком хранения 1 год растения достоверно имеют более высокие показатели роста, чем на идентичном по составу торфе данного месторождения без хранения.

Срок хранения не вызывает существенных изменений агрофизических свойств субстрата: плотность сложения субстрата уменьшилась на 12,6 %, изменение в плотности твердой фазы увеличилось менее чем на 1 %. Однако для получения более точных результатов, следует провести эксперименты с применением субстратов разного срока и условий хранения и отследить динамику изменения их агрофизических свойств.

По результатам моделирования изменения показателей массы сухого вещества сеянцев, выращенных в контейнерах, наиболее оптимальная плотность сложения субстрата в ячейках должна составлять $0,07 \dots 0,12 \text{ см}^3$, а плотность твердой фазы – $1,20 \dots 1,35 \text{ см}^3$.

Исследования по определению наиболее оптимальных для роста и развития параметров субстрата с целью совершенствования технологий производства корнезакрывающего субстрата требуют более глубокой проработки проблемы и проведения детальных экспериментов, включающих большее число вариантов.

Библиографический список

1. Жигунов А.В. Производство и лесокультурное использование посадочного материала с закрытыми корнями // III Всероссийский съезд лесничих. – Москва: Экология, 1995,- С. 280-283.
2. Жигунов А.В. Выращивание посадочного материала с закрытой корневой системой в Устьянском тепличном комплексе. Практические рекомендации / Сост. А. В. Жигунов, А. И. Соколов, В. А. Харитонов. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2016. – 43 с.
3. Зайцева, М.И. Использование порубочных остатков для приготовления торфяных субстратов при выращивании сеянцев сосны обыкновенной с закрытой корневой системой / М.И. Зайцева, Е.В. Робонен, Н.П. Чернобровкина // Вестник МГУЛ. – Лесной вестник. – 2010. – №1. – С. 4-8.
4. Мочалов Б. А. Подготовка почвы и выбор посадочного места при создании лесных культур сосны из сеянцев с закрытыми корнями // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2014. – №4 (340). – С. 15-20.
5. Родин, А.Р. Повышение результативности выращивания лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой / А.Р. Родин, С.А. Родин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2010. – №5. – С. 54-58.
6. Романов Е.М. Выращивание сеянцев с закрытой корневой системой в малых тепличных комплексах / Е.М. Романов, А.В. Ушнурцев, Д.И. Мухортов, Ю.Н. Гагарин // Лесное хозяйство. – 2007. – № 1. – С. 26–27.
7. Allaire-Leung, S.E. Changes in physical properties of peat substrates during plant growth / S.E. Allaire-Leung, J. Caron, L.E. Parent // Canadian Journal of Soil Science. – 1999. – Vol. 79. – P. 137-139.
8. Dumroese, R.K. Pelleted biochar: chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries / R.K. Dumroese, J. Heiskanen, K. Englund, A. Tervahauta // Biomass Bioenergy. – 2018. № 35. – P. 2027
9. Fukushima M. Effects of the maturity of wood waste compost on the structural features of humic acids / К. Fukushima K. Yamamoto, K. Ootsuka, T. Komai, U. Aramaki, S. Horiya // Bioresource Technology. – 2009. – Vol. 100. – №2. – P. 791-797.

10. Gruda N. Suitability of wood fiber substrate for production of vegetable transplants: I. Physical properties of wood fiber substrates / N. Gruda, W.H. Schnitzler // *Scientia Horticulturae*. – 2004. – Vol. 100, Issues 1-4. – P. 309-322.
11. Heiskanen, J. Favourable water and aeration conditions for growth media used in containerized tree seedling production: A review // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 1993. – No. 3. – P. 337-358
12. Jackson B.E. Pine Tree Substrate: an Alternative and Renewable Substrate for Horticultural Crop Production / B.E. Jackson, R.D. Wright // *Acta Hort*. – 2009. – Vol. 819. – P. 265–272.
13. Jackson, B.E. Amendment Affect Poinsettia Growth and Substrate Physical Properties / B.E. Jackson, R.D. Wright, M.C. Barnes // *HortScience horts*. – 2007. – No. 43(7). – P. 2155-2161.
14. Jackson, B.E. Pine Tree Substrate: an Alternative and Renewable Substrate for Horticultural Crop Production / B.E. Jackson, R.D. Wright // *Acta Hort*. – 2009. – Vol. 819. – P. 265–272.
15. Noguera, P. Influence of Particle Size on Physical and Chemical Properties of Coconut Coir Dust as Container Medium / P. Noguera, M. Abad, R. Puchades, A. Maquieira, V. Noguera // *Journal Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 2003. – Vol. 34, Issue 3-4. – P. 593-605.
16. Sarvas, M. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations / M. Sarvas, P. Pavlenda, E. Takacova // *Journal of forest science*. – 2007. – No. 5. – P. 204-209
17. Yeager, T.H. Best management practices: Guide for producing container-grown plants / T.H. Yeager, D.C. Fare, J. Lea-Cox, et al. // 2nd Ed. Southern Nurserymen's Assoc., Marietta, GA. – 2007. – No. 3. – P. 200-203

References

1. Zhigunov A.B. Proizvodstvo i lesokul'turnoe ispol'zovanie posadochnogo materiala s zakrytymi kornyami [Production and silvicultural use of planting material with closed roots], *III Vserossiiskii s"ezd lesnichikh*, Moskva: Ekologiya, 1995, pp. 280-283.
2. Zhigunov A.V. Vyrashchivanie posadochnogo materiala s zakrytoi kornevoi sistemoi v Ust'yanskom teplichnom komplekse. Prakticheskie rekomendatsii [Growing planting material with a closed root system in the Ustyansky greenhouse complex. Practical recommendations], Sost. A. V. Zhigunov, A. I. Sokolov, V. A. Kharitonov, Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2016, 43 p.
3. Zaitseva M. I., Robonen E. V., Chernobrovkina N. P. Ispol'zovanie porubochnykh ostatkov dlya prigotovleniya torfyanykh substratov pri vyrashchivanii seyantsev sosny obyknovЕННОI s zakrytoi kornevoi sistemoi [The use of felling residues for the preparation of peat substrates when growing seedlings of Scots pine with a closed root system], *Vestnik MGUL – Lesnoi vestnik* [Vestnik MGUL - Forest Herald], 2010, No. 1, pp. 4-8.
4. Rodin A. R., Rodin S. A. Povyshenie rezul'tativnosti vyrashchivaniya lesnykh kul'tur posadochnym materialom s zakrytoi kornevoi sistemoi [Improving the effectiveness of growing forest crops planting material with a closed root system], *Vestnik MGUL – Lesnoi vestnik* [Vestnik MGUL - Forest Herald], 2010, No. 5, pp. 54-58.
5. Romanov E.M., Ushnurtsev A.V., Mukhortov D.I., Gagarin Yu.N. Vyrashchivanie seyantsev s zakrytoi kornevoi sistemoi v malykh teplichnykh kompleksakh [Growing seedlings with a closed root system in small greenhouse complexes], *Lesnoe khozyaistvo* [Forestry], 2007, No. 1, pp. 26-27.
6. Mochalov B. A. Podgotovka pochvy i vybor posadochnogo mesta pri sozdanii lesnykh kul'tur sosny iz seyantsev s zakrytymi kornyami [Preparation of the soil and the choice of the seat when creating pine forest crops from seedlings with closed roots], *Izvestiya VUZov. Lesnoi zhurnal* [University News. Forest magazine], 2014, No. 4 (340), pp. 15-20
7. Allaire-Leung S. E., Can J. Changes in physical properties of peat substrates during plant growth, *Soil Sci*, 1999, Vol. 79, pp. 137–139.
8. Dumroese R.K., Heiskanen J., Englund K., Tervahauta A. Pelleted biochar: chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries, *Biomass Bioenergy*, 2018, No. 35, pp. 2027.
9. Fukushima M., Yamamoto K., Ootsuka K., Komai T., Aramaki U., Horiya S. Effects of the maturity of wood waste compost on the structural features of humic acids, *Bioresource Technology*, 2009, Vol. 100, No. 2, pp. 791-797.
10. Jackson B. E., Wright R.D. Pine Tree Substrate: an Alternative and Renewable Substrate for Horticultural Crop Production, *Acta Hort*, 2009, Vol. 819, pp. 265–272.
11. Gruda N., Schnitzler W.H. Suitability of wood fiber substrate for production of vegetable transplants: I. Physical properties of wood fiber substrates, *Scientia Horticulturae*, 2004, Vol. 100, Iss. 1-4, pp. 309-322.
12. Yeager T.H., Fare D.C., J. Lea-Cox J. et al. Best management practices: Guide for producing container-grown plants, 2nd Ed. *Southern Nurserymen's Assoc.*, 2007, No. 3, pp. 200-203.
13. Heiskanen J. Favourable water and aeration conditions for growth media used in containerized tree seedling production: A review, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1993, No. 3, pp. 337-358.
14. Jackson B.E., Wright R.D., Barnes M.C. Amendment Affect Poinsettia Growth and Substrate Physical Properties, *HortScience horts*, 2007, No. 43(7), pp. 2155-2161.
15. Sarvas M., Pavlenda P., Takacova E. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations, *Journal of forest science*, 2007, No. 5, pp. 204-209.
16. Noguera P., Abad M., Puchades R., Maquieira A., Noguera V. Influence of Particle Size on Physical and Chemical Properties of Coconut Coir Dust as Container Medium, *Journal Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, Vol. 34, Iss. 3-4, pp. 593-605.
17. Jackson B. E., Wright R.D. Pine Tree Substrate: an Alternative and Renewable Substrate for Horticultural Crop Production, *Acta Hort*, 2009, Vol. 819, pp. 265-272.

**ДИНАМИКИ ТАКСОНОМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СПЕКТРА ЖИЗНЕННЫХ
ФОРМ ФЛОРЫ ЛЕСОПАРКА ИМ. ЛЕСОВОДОВ БАШКОРТОСТАНА
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

Р. Р. Исяньюлова, Л. М. Ишбирдина, А. К. Габделхаков
Башкирский государственный аграрный университет

В статье представлены результаты проведенных исследований динамики флоры лесопарка им. Лесоводов Башкортостана (далее лесопарк) за 100 лет. По данным метеонаблюдений, в Башкирии за последние 30 лет среднегодовая температура воздуха повысилась на 0,7 °С. Это соответствует общемировым тенденциям. За сто последних лет среднегодовая температура воздуха в России повысилась на 1,29 °С, а в мировом масштабе – на 0,74. Изучение изменений флористического состава городских парков и лесопарков за продолжительный период позволяет оценить влияние антропогенного трансформирования территории и изменения климатических условий на флору естественных и полустественных растительных сообществ. Анализ флоры лесопарка проводился на основе собственных исследований авторов 2012-2019 гг. и изучения литературных данных. Выявлено, что флора лесопарка благодаря большому разнообразию экологических условий и типов растительных сообществ (естественные леса, лесные культуры, поляны, опушки, обочины дорожек и площадок, увлажненные местообитания) богата и содержит более 50 % видов флоры города Уфы. С начала XX века к 2019 году на территории лесопарка зарегистрировано 446 видов растений, относящихся к 71 семейству. За этот период исчезло 10 семейств, 60 родов, 116 видов, появилось 4 семейства, 20 родов, 34 вида. Возросла роль «синантропных» семейств Brassicaceae, Polygonaceae, Chenopodiaceae, уменьшилось количество видов в семействах Asteraceae, Rosaceae, Scrophulariaceae, Caryophyllaceae, Orchidaceae по причине влияния рекреационной нагрузки и изменения климатических условий. Количество терофитов возросло с 8 до 12 %, что отражает процесс «терофитизации» флоры.

Ключевые слова: городские лесопарки; флора; динамика флористического состава; спектр жизненных форм; синантропизация флоры, изменение климата.

**THE DYNAMICS OF TAXONOMIC COMPOSITION AND SPECTRUM
OF VITAL FORMS IN BASHKORTOSTAN URBAN FOREST
IN THE CONDITIONS OF CLIMATE CHANGE**

R. R. Isyanyulova, L. M. Ishbirdina, A. K. Gabdelhakov
Bashkir State Agrarian University

The article presents the results of research into the dynamics of flora changes over the past 100 years in Bashkortostan Urban Forest. The analysis of epy weather conditions in Bashkiria over the past 30 years has demonstrated an increase in the average annual temperature of 0.7 degrees, which is in line with the global trends. Over the past hundred years, the average annual air temperature in Russia has increased by 1.29⁰ C, by 0.74⁰ C, on a global scale. The research into the changes of floristic composition of urban parks and forest parks over a long period allows us to assess the impact of anthropogenic transformation of the area and climate change on the flora of natural and semi-natural plant communities. The flora of the forest park was analyzed based on research carried out between 2012 and 2019 and published data. Due to extensive variety of environmental conditions and types of plant communities (natural forests, forest crops, glades, edges, roadsides and platforms, moist habitats) the flora of the forest park is rich and contains over 50% of all the species found in Ufa. Since the beginning of the twentieth century to 2019 446 species of plants from 71 plant families have been registered in the forest park. However, over the same period, 10 plant families, 60 genera, 116 species have disappeared, 4 families, 20 genera, 34 species emerged.

The importance of «synanthropic» families Brassicaceae, Polygonaceae, Chenopodiaceae has increased; the number of species in plant families Asteraceae, Rosaceae, Scrophulariaceae, Caryophyllaceae, Orchidaceae has decreased due to the influence of recreational load and climate change. The number of therophytes has increased from 8% to 12%, thus, remarking the process of flora «therophitization».

Keywords: *urban forest parks; flora; floristic composition dynamics; variety of life forms; synanthropic flora, climate change.*

Введение

Ученые-экологи, климатологи, синоптики по всему миру бьют тревогу. Одни уверяют, что нашу планету ждет очередной ледниковый период, другие – глобальное потепление. Из специального доклада МГЭИК о последствиях глобального потепления на 1,5 °С следует, что по расчетным оценкам, деятельность человека является причиной глобального потепления примерно на 1,0 °С выше доиндустриальных уровней с вероятным диапазоном от 0,8 °С до 1,2 °С. Вероятно, глобальное потепление достигнет 1,5 °С в период между 2030 и 2052 годами, если оно продолжит повышаться сегодняшними темпами (Special report..., 2018).

Участниками международной конференции, проведенной Институтом экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича НАН Беларуси совместно с Национальным парком «Беловежская пуца», в 2018 г. было подтверждено планетарное значение растений как одного из факторов устойчивого развития цивилизации. Отмечены серьезные последствия стихийных бедствий, обусловленные изменением климата, с которыми столкнулось лесное хозяйство. В лесах стран-участниц конференции имеет место массовая гибель древостоев *Pinus*, *Picea*, *Abies*, *Quercus*, *Fraxinus*. К числу проблем, требующих практического решения, были отнесены оценка влияния изменений климата на природный растительный покров; разработка методов контроля генетических последствий влияния антропогенной (техногенной) деятельности и изменений климата (Воробьев и др., 2019); развитие методов прогнозирования негативных природных явлений (экстремальных климатических, массовых размножений вредителей, болезней растений, ураганов, затоплений и подтоплений и т.п.) и их последствий для природной растительности (V Міжнародная наукова..., 2018).

Городские лесопарки, являясь неотъемлемыми компонентами зеленой инфраструктуры в городской среде (Cornelis, Hermy, 2004; Chiesura, 2004; Turner et al., 2005; Nielsen et al., 2014), сохраняют природные сообщества, биоразнообразие, влияют на микроклиматический режим, способствуют чистоте воды и воздуха, уменьшению шума и ветра, улучшению психологического и физического состояния человека (Tzoulas et al., 2007; Bermudez, Cantos, 2012; Lovell, Taylor, 2013; Li Z et al., 2018). Однако в условиях изменения климата и рекреационного воздействия эти функции могут снижаться (Воробьев и др., 2015).

Республику Башкортостан изменение климата тоже не обошло стороной (Погода..., 2019). Регион является одним из ведущих в стране и обладает хорошим ресурсно-экологическим потенциалом. Современное изменение климата прямо или косвенно отражается на состоянии лесопарков. Изучение данных процессов как на глобальном уровне, так и в условиях конкретного объекта на территории города или населенного пункта (Liang et al., 2016) дает возможность определить существующую картину для прогноза предполагаемых изменений и разработки рекомендаций адаптации ведения хозяйства в лесопарках. Знания флористического состава и структуры лесопарковых сообществ имеют решающее значение для большего понимания их динамики и, только в случае надежных экологических данных в конечном итоге, способствуют применению рациональных методов управления (Glaesaer, 2006; Курбанов и др. 2018).

Целью и задачей данной работы было изучение динамики таксономического состава и спектра жизненных форм флоры лесопарка за 100 лет с учетом влияния изменений климатических условий и использования территории, посадок лесных культур и рекреации.

Материалы, объект и методы исследования

По данным метеонаблюдений, в Башкирии за последние 30 лет среднегодовая температура воздуха повысилась на 0,7 °С. Это соответствует общемировым тенденциям. За сто последних лет среднегодовая температура воздуха в России повысилась на 1,29 °С, в мировом масштабе – на 0,74. Также в республике возросло годовое количество осадков. При среднем уровне для региона 499 мм в год за последнее десятилетие он составил 502 мм (Исследование РБК, 2017).

Лаборатория особо охраняемых природных территорий и биологических ресурсов НИИ безопасности жизнедеятельности Республики Башкортостан уже около десяти лет занимается проблемами изменения состояния лесов республики. Были получены результаты, говорящие о том, что в ряде районов Башкортостана леса испытывают дефицит влаги, приросты биомассы снижаются, и эта тенденция нарастает.

Для анализа климатических изменений использовались данные о среднегодовых температурах с метеостанций по г. Уфе за период с 1960 по 2013 год (ВНИИ гидрометеорологии РФ, 2019). Из графика на рисунке 1 очевидно, что за последние 53 года наблюдается увеличение среднегодовой температуры на территории города.

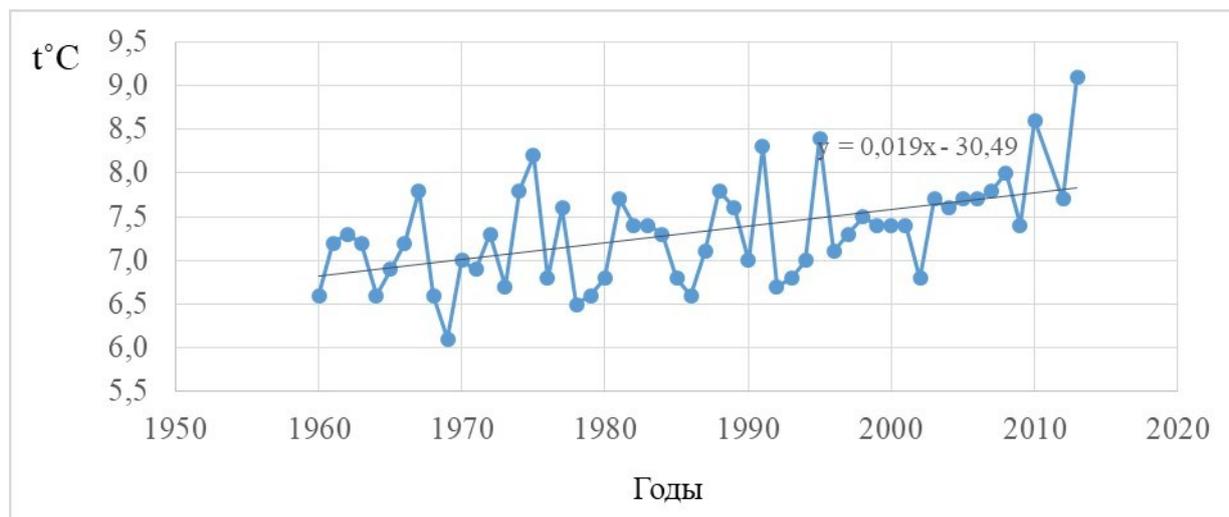


Рис.1. Среднегодовая температура по г. Уфе за последние 50 лет

Изучение динамики многолетней температуры на всей территории республики показывает, что за последние 100 лет, несмотря на определенную цикличность, она имеет очевидный тренд роста (Общественная ..., 2019).

Как отмечает А. Волков (2017) годовые суммы осадков на территории республики в общем имели тенденцию к некоторому росту в период с 1966 по 1996 год, а до 2012 года отмечается снижение количества осадков. Следовательно, климатический режим в регионе меняется: среднегодовые температуры становятся выше, а осадков меньше. Таким образом, условия для роста деревьев в лесах оказываются хуже, дефицит влаги существенен в южной половине Башкортостана, где он отмечался и раньше. Сегодня наблюдаются сдвиг южной границы лесных массивов на север и постепенное обезлесение значительной части территории республики.

Изучение изменений флористического состава городских парков и лесопарков за продолжительный период позволяет оценить влияние антропогенного трансформирования террито-

рии и изменения климатических условий на флору естественных и полустественных растительных сообществ.

Таксономический анализ флоры лесопарка имени Лесоводов Башкортостана (далее лесопарк) проводился на основе собственных авторских исследований 2012-2019 гг. и изучения литературных данных. При этом применялись принципы и методы, принятые в сравнительной флористике (Гнатюк, 2005). Исследования А.К. Носкова (1931) дали возможность проанализировать динамику флористического состава лесопарка за 100 лет.

Лесопарк имени Лесоводов Башкортостана был основан в сентябре 1966 г. (Хайретдинов, 1981) по инициативе в то время министра лесного хозяйства республики А.М. Хабибовича по проекту, составленным бывшим директором Уфимского мехлесхоза (лесокомбината) Я.У. Ибрагимовичем.

Выбор участка леса для организации лесопарка был весьма выигрышным. Сосредоточие на сравнительно небольшой территории основных растительных формаций, разных типов почв, близость к жилым районам придают ему особую привлекательность. Территория лесопарка расположена на повышенном водораздельном плато между речкой Сутолока и рекой Уфа в юго-восточной части г. Уфы.

Лесные насаждения благодаря расчлененному рельефу и разнообразию почвенного покрова также разнообразны. Самыми распространенными древесными видами лесопарка являются *Quercus robur*, *Tilia cordata*, *Acer platanoides*, *Ulmus glabra*, *Pinus sylvestris*, *Populus tremula*, *Populus* и др.

Вся территория лесного участка общей площадью 112,7 га относится к защитным лесам, по целевому назначению – выполняющие функции защиты природных и иных объектов: зеленые зоны. Общая его площадь по категориям земель распределяется следующим образом (га): покрытая лесом площадь составляет 84,4, в том числе культуры – 16,3, редины – 0,4; вырубки – 0,4; воды – 1,0; дороги, тропы – 1,5; просеки – 0,9; Дом природы – 2,5; болота – 0,2; поляны – 8,6.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Таксономическая структура флоры. С начала XX века к 2019 г. на территории лесопарка зарегистрировано 446 видов, относящихся к 71 семейству; 116 видов в настоящее время уже не встречаются. Появилось 34 новых вида, находящихся сейчас в разной степени натурализации (рис. 2). Благодаря большому разнообразию экологических условий и типов растительных сообществ, флора лесопарка включает 54,5 % видов от флоры города Уфы (Ишбирдина, 1992). Большая часть видов относится к цветковым растениям (класс хвойные – 7 видов, 1,5 % флоры, 2 семейства; класс двудольные – 353 вида, 80,6 % флоры, 51 семейство; класс однодольные – 70 видов, 16 % флоры, 12 семейств). Классу хвоци принадлежит 2 вида (0,45 % флоры), к классу папоротники – 6 (1,36 % флоры, 5 семейств). Видов двудольных представлено в 5 раз больше, чем однодольных.

За прошедшие 100 лет на территории лесопарка исчезли представители 10 семейств (*Alliaceae*, *Araceae*, *Iridaceae*, *Polemoniaceae*, *Santalaceae* и др.). Появились виды, относящиеся к 4 семействам (*Berberidaceae*, *Cupressaceae*, *Oleaceae*, *Portulacaceae*). В начале XX века семейство *Orchidaceae* было представлено 10 видами (*Cephalanthera rubra*, *Cypripedium calceolus*, *Dactylorhiza incarnate*, *Epipactis helleborine*, *E. palustris*, *Gymnadenia conopsea*, *Herminium monorchis*, *Liparis loeselii*, *Listera ovata*, *Neottia nidusavis*), в настоящее время на территории лесопарка отмечен только один вид – *Epipactis helleborine*, остальные исчезли в результате высокой антропогенной нагрузки и рекреации (рис. 3).

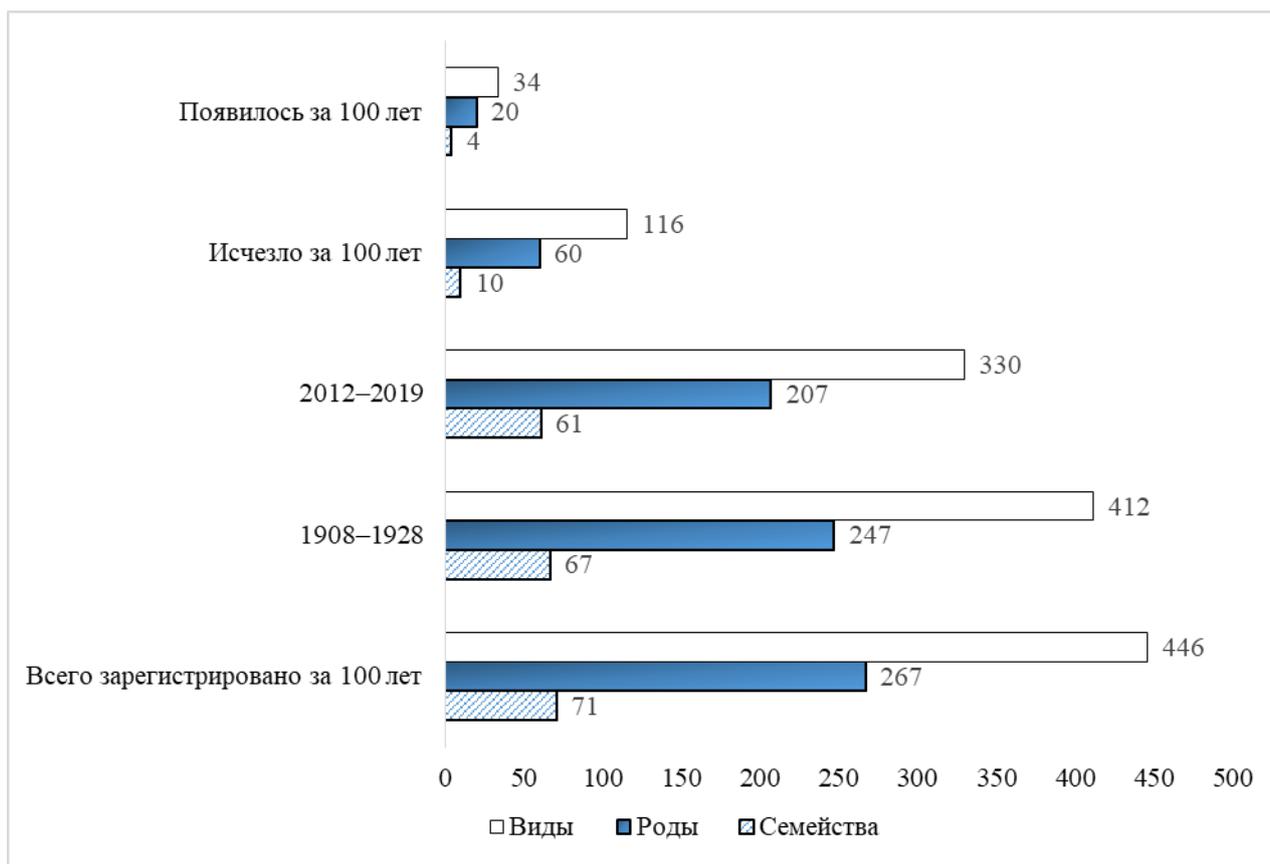


Рис. 2. Изменение таксономического спектра флоры лесопарка им. Лесоводов Башкортостана за 100 лет

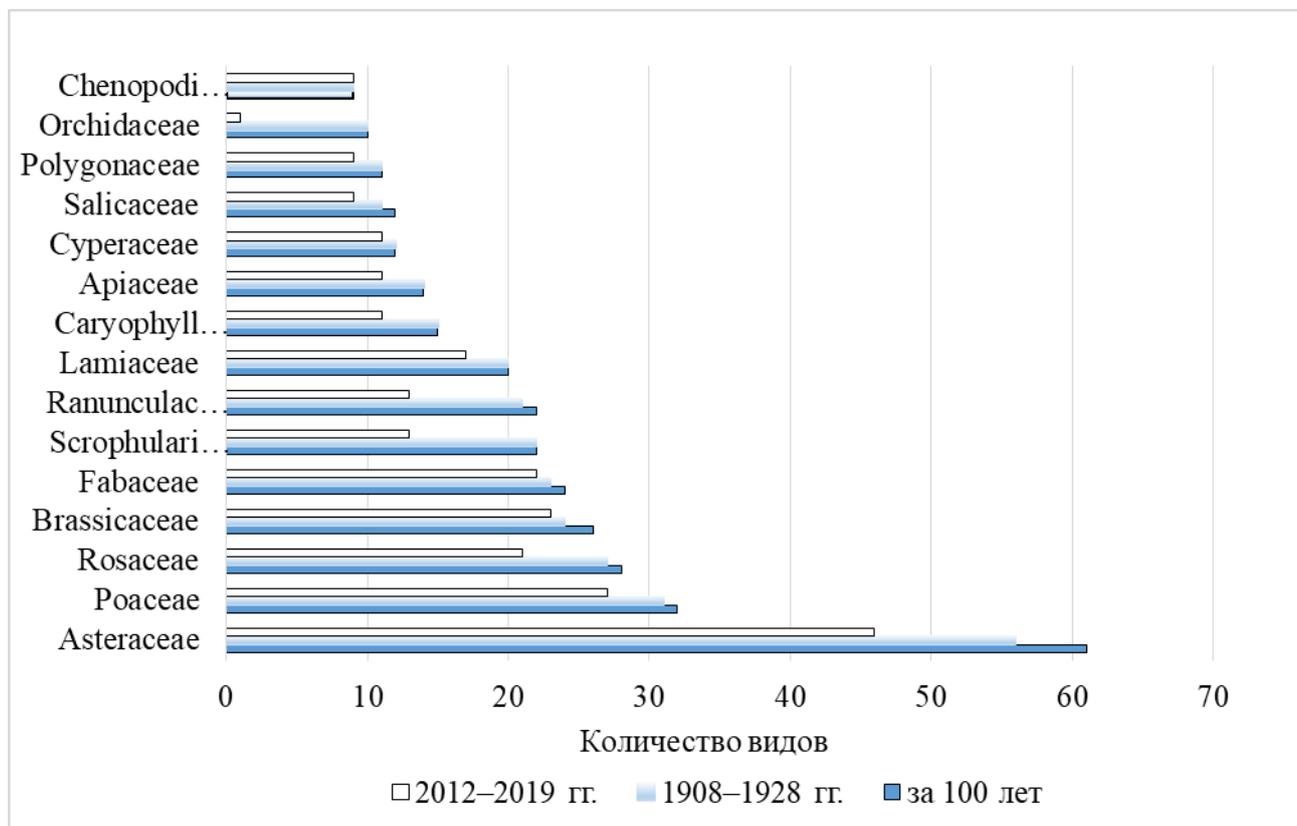


Рис. 3. Ведущие семейства во флоре лесопарка им. Лесоводов Башкортостана

II. *Спектр жизненных форм.* Соотношение разных жизненных форм растений в растительных сообществах является важным показателем состояния растительного покрова. Жизненная форма – это комплекс морфологических признаков, связанных с ритмом развития, отражающих приспособленность вида к современным и прошлым условиям среды в целом, ко всему комплексу факторов местообитания (Иванов, 2011). Система жизненных форм достаточно хорошо характеризует приспособленность различных видов растений к перенесению неблагоприятных погодных и климатических условий в зимний период (Иванов, 2011).

Самой многочисленной группой во флоре лесопарка являются гемикриптофиты. Их количество (рис. 4) в начале XX века составляло 57 %, а спустя столетие – 50 % при исчезновении 72 видов и появлении 4. Большие изменения произошли во второй по величине группе криптофитов, несмотря на то, что они лучше защищены от зимних холодов (почечные чешуи, слой почвы, опад, подстилка, снежный покров), однако весной побеги вынуждены преодолевать слой почвы, уплотненной при сильном антропогенном прессе. За 100 лет эта группа уменьшилась на 21 вид.

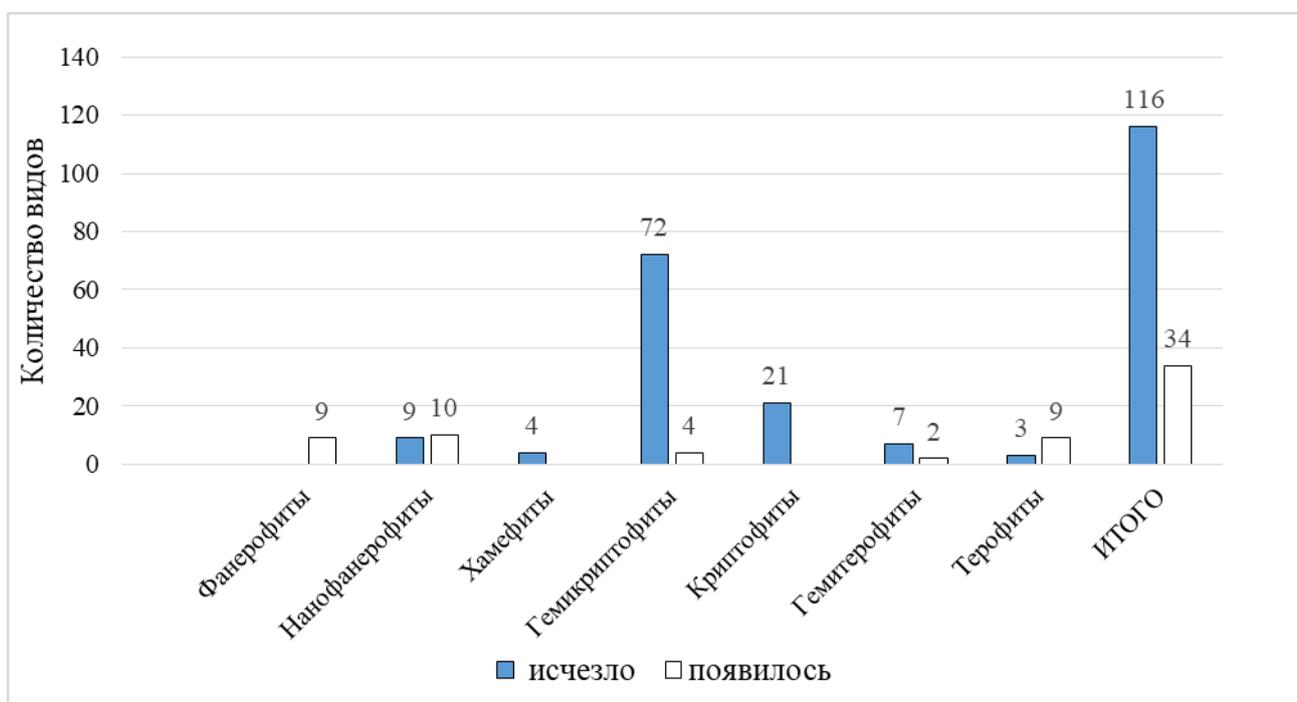


Рис. 4. Трансформация в спектре жизненных форм флоры лесопарка им. Лесоводов Башкортостана за 100 лет

Значительно изменилось соотношение естественных и интродуцированных фанерофитов и нанофанерофитов за счет исчезновения таких дикорастущих видов, как *Daphne mezereum*, *Amygdalus nana*, *Salix rosmarinifolia* и др. и высаживания интродуцентов: *Syringa vulgaris*, *Philadelphus latifolius*, *Picea pungens*, *Acer negundo*, *A. tataricum* и т. д., а также благодаря натурализации видов из ботанического сада, например, *Mahonia aquifolium* и *Berberis vulgaris* (Ишбирдина, 1991).

Группа терофитов в начале XX века насчитывала 34 вида, что составляло 8 % видов флоры при исчезновении 3 видов и появлении 9, в современной флоре лесопарка их доля составляет 12 %. Количественное доминирование гемикриптофитов над другими биологическими типами является следствием прямой связи флоры лесопарка с флорой естественных сообществ, расположенных в окрестностях г. Уфы. Рост количества терофитов вызван длительным и интенсивным антропогенным воздействием на растительные сообщества территории, т. к. большая часть терофитов – это рудеральные виды. Увеличение относительного количества одно-

летников отражает процесс «терофитизации» флоры, характерный для синантропизирующихся городских местообитаний (Jurko, 1984).

Выводы

Флора лесопарка благодаря большому разнообразию экологических условий и типов растительных сообществ (естественные леса, лесные культуры, поляны, опушки, обочины дорог и площадок, увлажненные местообитания) богата и содержит более 50 % видов от флоры города Уфы. По литературным данным, количество видов, зафиксированное в городских парках, колеблется от 173 (Иванов, 2011) до 303 видов (Лисичкина, 2007). Всего на исследуемой территории выявлено 446 видов сосудистых растений, относящихся к 71 семейству. Флористический анализ показал, что за 100 лет во флоре лесопарка исчезло 116 видов, 60 родов и 10 семейств, а появилось 34 новых вида, 20 родов и 4 новых семейства.

За 100 лет заметно возросла роль «синантропных» семейств *Brassicaceae*, *Polygonaceae*, *Chenopodiaceae* и уменьшилась доля видов семейств *Asteraceae*, *Rosaceae*, *Scrophulariaceae*, *Caryophyllaceae*, *Orchidaceae*, что отражает процессы усиления антропогенной нагрузки, изменения климатических показателей по температуре воздуха и относительной влажности. В биологическом спектре жизненных форм современной флоры лесопарка преобладают гемикриптофиты (168 видов) и криптофиты (36 видов), фанерофиты и нанофанерофиты (46 видов), однако также велика доля терофитов и гемитерофитов (52 вида). Доминирование гемикриптофитов над другими биологическими типами указывает на прямую связь флоры лесопарка с флорой естественных сообществ, расположенных в окрестностях г. Уфы. Рост участия терофитов в растительных сообществах территории вызван длительным и интенсивным антропогенным прессом на растительный покров изучаемой территории, т. к. большая часть терофитов – это рудеральные растения. Увеличение относительного количества однолетников отражает процесс «терофитизации» флоры, характерный для синантропизирующихся городских местообитаний.

Общая характеристика флористического разнообразия, знание особенностей флористической, биоморфологической и эколого-ценотической структур растительности городских парков и лесопарков необходимы для их оценки в связи с климатическими изменениями в районах с высоким уровнем антропогенной нагрузки для флористического районирования территорий, выделения основных направлений антропогенной трансформации фитобиоты и разработки эффективных способов обеспечения фиторазнообразия в структуре региональной экологической сети.

Библиографический список

1. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг городских лесов / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева, О.В. Коптелов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 1(25). – С. 5-21.
2. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем: монография / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, Е.Н. Демишева, С.А. Меньшиков, М.С. Али, Л.Н. Смирнова, Л.В. Тарасова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019. – 166 с.
3. Гнатюк, Е. П. Методы исследования ценофлор: на примере растительных сообществ вырубок Карелии: учеб.-метод. пособие / Е. П. Гнатюк, А. М. Крышень. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. – 68 с.
4. Иванов, Е.С. Биоморфологическая структура флоры природного историко-архитектурного и рекреационного комплекса – усадьба «Воронцово» г. Москвы / Е.С. Иванов, Н.В. Авдеева, Т.В. Кременецкая // Российский научный журнал. – 2011. – № 22. – С. 290-296.
5. Ишбирдина, Л.М. Синантропные древесные сообщества г. Уфы / Л.М. Ишбирдина, А.Р. Ишбирдин // Ботан. журн. – 1991. – Т. 7, № 4. – С. 548-555.
6. Ишбирдина, Л.М. Эколого-биологическая характеристика флоры и растительности города Уфы и их динамика за 60–80 лет: автореф. дисс. ... канд. биол. наук / Л.М. Ишбирдина. Днепропетровск, 1992. – 16 с.

7. Конашова, С.И. Антропогенная динамика травяного яруса / С.И. Конашова, Р.Р. Султанова, М.Р. Сахибгареев, Т.А. Нуриев // Актуальные проблемы лесного комплекса. Информационные материалы международной научно-технической конференции «Лес-2000», посвящается 70-летию БГИТА, 2000. – С. 36-37.
8. Курбанов, Э.А. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2 / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Меньшиков, Л.Н. Смирнова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 5. – С. 154-166.
9. Лисичкина, В.В. Эколого-флористическая характеристика городских парков Карелии: автореф. дисс. ... канд. биол. наук / В.В. Лисичкина. – Петрозаводск, 2007. – 22 с.
10. Носков, А.К. Уфа и ее окрестности / А.К. Носков // Тр. Ботан сада АН СССР. – 1931. – Т. 42. Вып. 2. – С. 181–209.
11. Хайретдинов, А.Ф. Природа и насаждения зеленой зоны города Уфы / А.Ф. Хайретдинов, М.Р. Хамзин, У.И. Янбухтин. Уфа: Башкирское книжное издательство, 1981. – 80 с.
12. 9. Волков, А. Отношение к лесам Башкирии необходимо менять [Электронный ресурс] / А. Волков. – Режим доступа: <http://www.i-gazeta.com/news/nauka102/33120.html> – 22.04.2019.
13. Общественная электронная газета // Новости // Наука 102. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.i-gazeta.com/news/nauka102/33120.html> – 01.05.2019 г.
14. ВНИИ гидрометеорологии РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meteo.ru/> - 02.05.2019.
15. Погода, которая нас удивляет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bashinform.ru/longread/pogoda/>. – 01.05.2019 г.
16. Исследование РБК-Уфа: Как на Башкирию влияет изменение климата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ufa.rbc.ru/ufa/29/06/2017/>. – 01.05.2019 г.
17. V Міжнародна наукова конференція «Моніторинг і оцінка стану рослинного свету», 2018 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://botany.by/2018/03/v-mezhdunarodnaya-nauchnaya-konferenciya-monitoring-i-ocenka-sostoyaniya-rastitelnogo-mira/> - 02.05.2019 г.
18. Bermudez RS, Cantos MCG. Development and validation of flora inventory management system. MSEUF Research Studies. 2012; 14(1. – P. 4-13.
19. Chiesura A. The role of urban parks for the sustainable city. Landscape and Urban Planning 68 (2004)1. – P. 129 - 138.
20. Cornelis, J., and Hermy, M. (2004). Biodiversity relationships in urban and suburban parks in Flanders. Landscape Urban Planning 69. – P. 385-401. doi: 10.1016/j.landurbplan.2003.10.038
21. Glaesaer, Carsten W. (2006). The Floristic Composition and Community Structure of the Forest Park Woodland, Queens County, New York. Urban Habitats 4.1. – P. 102-126.
22. Jurko A. Vegetationsökologische Unterschiede zwischen naturnahen und naturfremden Walddgesellschaften der kleinen Karpaten. Acta bot. Slov. Accd. Sci. Slovace. Ser. A. 1984. – P. 97-106.
23. Li Z, Chen D, Cai S, Che S (2018) The ecological services of plant communities in parks for climate control and recreation—A case study in Shanghai, China. PLoS ONE 13(4): e0196445. – URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196445>. – 02.05.2019 г.
24. Liang Ch., Yu B., Yang F., Mayer H. Intra-urban differences of mean radiant temperature in different urban settings in Shanghai and implications for heat stress under heatwaves: A GIS-based approach // Energie and Buildings. 2016. – № 130. – P. 829-842.
25. Lovell, S. T., and Taylor, J. R. (2013). Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. Landscape Ecol. 28. – P. 1447–1463. doi: 10.1007/s10980-013-9912-y
26. Nielsen, A. B., van den Bosch, M., Maruthaveeran, S., and van den Bosch, C. K. (2014). Species richness in urban parks and its drivers: a review of empirical evidence. Urban Ecosyst. 17. – P. 305-327. doi: 10.1007/s11252-013-0316-1
27. SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. [Electronic resource]. – URL: <http://www.ipcc.ch/report/sr15/> – 02.05.2019 г.
28. Turner, K., Lefler, L., and Freedman, B. (2005). Plant communities of selected urbanized areas of Halifax, Nova Scotia, Canada. Landscape Urban Planning 71. – P. 191–206. doi: 10.1016/j.landurbplan.2004.03.003
29. Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kazmierczak, A., Niemela, J., et al. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: a literature review. Landscape Urban Planning 81. – P. 167–178. doi: 10.1016/j.landurbplan.2007.02.001

References

1. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N., Koptelov O.V. Distantionnyi monitoring gorodskikh lesov [Remote monitoring of urban forests], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature management.], 2015, No. 1(25), pp. 5-21.
2. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Demisheva E.N., Men'shikov S.A., Ali M.S., Smirnova L.N., Tarasova L.V. Distantionnyi monitoring ustoychivosti lesnykh ekosistem [Remote monitoring of the sustainability of forest ecosystems]: monografiya, Yoshkar-Ola: Povolzhskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 2019, 166 p.
3. Gnatyuk E.P., Kryshen A.M. Metody issledovaniya tsenoflor: na primere rastitel'nykh soobshchestv vyrubok Karelii [Research methods of coenoflora: on the example of plant communities of felling of Karelia], Petrozavodsk, 2005, 68 p.

4. Ivanov E.S., Avdeeva N.V., Kremeneckaja T.V. Biomorfologičeskaja struktura flory prirodno istoriko-arhitekturnogo i rekreacionnogo kompleksa – usad'ba “Voroncovo” g. Moskvy [Biomorphological structure of flora of natural historical-architectural and recreational complex-estate “Vorontsovo” of Moscow], *Rossijskij nauchnyj zhurnal* [Russian scientific journal], 2011, No. 22. pp. 290-296.
5. Ishbirdina L.M., Ishbirdin A.R. Sinantropnye drevesnye soobshhestva, g. Ufy [Synanthropic tree communities of Ufa], *Botan. Zhurn.*, 1991, Vol. 7, No. 4, pp. 548–555.
6. Ishbirdina L.M. Jekologo-biologičeskaja harakteristika flory i rastitel'nosti goroda Ufy i ih dinamika za 60–80 let: avtoref. diss. ... kand. biol. nauk [Ecological and biological characteristics of flora and vegetation of Ufa and their dynamics for 60-80 years Cand.bio.sci.thesis], Dnepropetrovsk, 1992, 16 p.
7. Konashova S.I., Sultanova R.R., Sahibgareev M.R., Nuriev T.A. Antropogennaja dinamika travjanogo jarusa [Anthropogenic dynamics of the grass tier], *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex]. *Informacionnye materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii “Les,2000”, posvjashaetsja 70letiju BGITA*, 2000, pp. 36-37.
8. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Men'shikov S.A., Smirnova L.N. Raspoznavanie lesnykh nasazhdenii i dominiruyushchikh drevesnykh porod Penzenskoi oblasti po dannym sputnika Sentinel-2 [Recognition of forest plantations and dominant tree species of the Penza region according to the Sentinel-2 satellite], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 154-166.
9. Lisichkina V.V. Jekologo-floristicheskaja harakteristika gorodskih parkov Karelii: avtoref. diss. ... kand. biol. nauk [Ecological and floristic characteristics of urban parks of Karelia Cand.bio.sci.thesis], Petrozavodsk, 2007, 22 p.
10. Noskov A.K. Ufa i ee okrestnosti [Ufa and its surroundings], *Tr. Botan. sada AN SSSR* [Proceedings of the Botanical Garden of the Academy of Sciences of the USSR], 1931, Vol. 42, No. 2, pp. 181–209.
11. Hajretidinov A.F., Hamzin M.R., Janbuhtin U.I. Priroda i nasazhdeniya zelenoj zony goroda Ufy [Nature and plantings of the green zone of Ufa], Ufa: Bashkirskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1981, 80 p.
12. Volkov A. Otnoshenie k lesam Bashkirii neobhodimo menjat' [Nature and plantings of the green zone of Ufa], URL: <http://www.i-gazeta.com/news/nauka102/33120.html> – 22.04.2019.
13. Obshestvennaja jelektronnaja gazeta [Public electronic newspaper], Novosti, Nauka 102, URL: <http://www.i-gazeta.com/news/nauka102/33120.html>, 01.05.2019.
14. VNII gidrometeorologii RF [Research Institute of Hydrometeorology], URL: <http://meteo.ru/> 02.05.2019
15. Pogoda, kotoraja nas udivljaet [The weather that we were surprised], URL: <http://www.bashinform.ru/longread/pogoda>, 01.05.2019
16. Issledovanie RBK-Ufa: Kak na Bashkiriju vlijaet izmenenie klimata [RBC-Ufa study: how Bashkiria is affected by climate change], URL: <https://ufa.rbc.ru/ufa/29/06/2017>, 01.05.2019
17. V Mizhnarodnaya navukovaya kanferenczyya “Manitoryng i aczenka stanu raslinnaga svetu” [Spectral database of forest cover], URL: http://botany.by/2018/03/v_mezhdunarodnaya_nauchnaya_konferenciya_monitoring_i_ocenka_sostoyaniya_rastitelnogo_mira, 02.05.2019
18. Bermudez RS, Cantos M.C.G. Development and validation of flora inventory management system, *MSEUF Research Studies*, 2012; 14(1), pp. 4–13.
19. Chiesura A. The role of urban parks for the sustainable city, *Landscape and Urban Planning*, No. 68 (2004), pp. 129 - 138.
20. Cornelis J., Hermy M. Biodiversity relationships in urban and suburban parks in Flanders, *Landscape Urban Planning*, 2004, No. 69, pp. 385-401, doi: 10.1016/j.landurbplan.2003.10.038
21. Glaeser Carsten W. The Floristic Composition and Community Structure of the Forest Park Woodland, Queens County, New York, *Urban Habitats*, 2006, No. 4.1, pp. 102-126.
22. Jurko A. Vegetations ökologische Unterschiede zwischen naturnachen und naturfremden Walldgesellschaften der kleinen Karpaten. *Acta bot. Slov. Accd. Sci. Slovacae. Ser. A.*, 1984, P. 97-106.
23. Li Z., Chen D., Cai S., Che S. The ecological services of plant communities in parks for climate control and recreation—A case study in Shanghai, China, *PLoS ONE*, 2018, No. 13(4): e0196445, URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196445>. – 02.05.2019 r.
24. Liang Ch., Yu B., Yang F., Mayer H. Intra-urban differences of mean radiant temperature in different urban settings in Shanghai and implications for heat stress under heatwaves: A GIS-based approach. *Energie and Buildings*, 2016, No. 130, pp. 829-842.
25. Lovell S. T., Taylor, J. R. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States, *Landscape Ecol.*, 2013, No. 28, pp. 1447–1463, doi: 10.1007/s10980-013-9912-y
26. Nielsen A.B., Van den Bosch M., Maruthaveeran S., Van den Bosch, C. K. Species richness in urban parks and its drivers: a review of empirical evidence, *Urban Ecosyst*, 2014, No. 17, pp. 305–327, doi: 10.1007/s11252-013-0316-1
27. SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. [Electronic resource], URL: <http://www.ipcc.ch/report/sr15/> – 02.05.2019.
28. Turner K., Lefler L., Freedman B. Plant communities of selected urbanized areas of Halifax, Nova Scotia, Canada, *Landscape Urban Planning*, 2005, No. 71, P. 191–206, doi: 10.1016/j.landurbplan.2004.03.003.
29. Tzoulas K., Korpela K., Venn S., Yli-Pelkonen V., Kazmierczak A., Niemela J. et al. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: a literature review, *Landscape Urban Planning*, 2007, No. 81, pp. 167–178, doi: 10.1016/j.landurbplan.2007.02.001.

ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ОРНИТОФАУНЫ, НЕ ОТНЕСЕННОЙ К ОБЪЕКТАМ ОХОТЫ, В ЛЕСНЫХ БИОТОПАХ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ КАК ФАКТОР СТАБИЛЬНОСТИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Ю. Г. Мальков

Поволжский государственный технологический университет

На основании орнитологических учетов сделана попытка оценки видового состава и плотности орнитофауны, не отнесенной к объектам охоты, в основных лесных биотопах Республики Марий Эл, распределения видового состава в зависимости от структуры лесного биотопа, формирующего кормовые, защитные и гнездопригодные условия. Определены видовой состав и плотность населения птиц в таких биотопах, как чистые хвойные, смешанные хвойно-лиственные насаждения разного возраста, околородные и полевые биотопы. В процентном отношении наибольшую долю от общего числа учтенных видов занимают представители семейства Славковые (Sylviidae), далее идут представители семейства Дроздовые (Turdinae) и Трясогузковые (Motacillidae). Установлено, что видовой состав орнитофауны лесных, околородных биотопов и прилегающих к ним территорий весьма различен и в основном сосредоточен в опушечной части лесных биотопов, сложных по своей структуре, чаще смешанного состава с наличием подлеска, высокой или средней вертикальной и горизонтальной сомкнутостью и чередующихся с участками открытых пространств (полями). Одним из определяющих факторов является густота подлеска. В таких условиях отмечены наибольшее видовое разнообразие и высокая плотность орнитофауны. Сравнение индексов биоразнообразия в различных биотопах не показывает четко выраженных тенденций изменения видового разнообразия орнитофауны, однако в пределах более или менее однородных лесных биотопов показатели относительно сравнимы между собой. С увеличением числа видов в биотопах максимальные значения индексов Шеннона и Симпсона увеличиваются. Учтенные виды орнитофауны при установленной их плотности можно уверенно отнести к наиболее типичным и многочисленным для условий лесных районов республики. Единичные представители отдельных семейств, установленные в ходе натурных исследований, целесообразно отнести к редким и малочисленным, следовательно, необходимо определить меры по их сохранению, включая охрану среды их обитания.

Ключевые слова: орнитофауна, учет, биотопы, численность, видовое разнообразие, муниципальный район.

SPECIES DIVERSITY OF NONGAME ORNITHOLOGICAL FAUNA IN FOREST BIOTOPES OF MARI EL REPUBLIC AS A KEY TO SUSTAINABILITY OF FOREST ECOSYSTEMS

Iu. G. Malkov

Volga State University of Technology

The paper assesses the species composition and density of nongame ornithological fauna in basic forest biotopes of Mari El Republic. The research is based on ornithological survey data, and analyses the species distribution depending on the structure of forest biotope providing food, protection and nesting. The author determines the species composition and population density of birds in pure coniferous, mixed coniferous-deciduous plantations of different age, wetland and field biotopes. The largest percentage share of the total number of recorded species is represented by the Sylviidae family, followed by representatives of the Turdinae and Motacillidae families. It has been established that the species composition of ornithological fauna in forest and wetland biotopes and adjacent territories is quite diverse and primarily centers at the edge of forest biotopes, characterized by complex structure, mixed composition with coppice, alternating high or medium vertical and horizontal canopy density and open spaces (forest glades). Canopy density is one of the determining factors in this respect. In such conditions the species diversity and ornithological fauna has

been recorded with the highest values. The comparison of biodiversity indices in different biotopes does not reveal clear trends of the changes in ornithofauna species diversity, but within more or less homogeneous forest biotopes, the indicators are relatively comparable. With the increase in the number of species in biotopes, the maximum values of Shannon and Simpson indices also demonstrate growth. The registered species of ornithofauna can be confidently attributed to the most typical and numerous species found in the forest areas of the Republic provided their density is known. It is recommended that individual representatives of individual families, encountered in field studies should be referred to as rare and insignificant in number. Therefore, it is necessary to indicate actions for their conservation and protection of their habitat.

Key words: *ornithofauna, to register, biotopes, number of birds, species diversity, municipality.*

Введение. Стабильность экологических систем определяется многими факторами, одним из которых является биологическое разнообразие фаунистических видов, среди которых существенная роль принадлежит орнитофауне. В лесных экосистемах особо заметную функцию выполняют насекомоядные виды птиц отряда воробьинообразных (*Passeriformes*) в период выкармливания птенцов, когда в качестве пищи уничтожаются насекомые – вредители леса. Использование насекомоядных видов птиц является одним из методов интегрированной защиты леса (Алексеев и др., 2013), направленных на повышение стабильности лесных экосистем. При соответствующей организации работ, направленных на создание кормовых, защитных и воспроизводственных условий насекомоядных видов орнитофауны в лесных участках данный метод является относительно экономичным и эффективным. Ключевую роль в применении данного метода играет определение видового состава и численности орнитофауны, факторов, влияющих на их состояние.

В условиях Республики Марий Эл исследованиями видового состава орнитофауны посвящены работы ряда зоологов и орнитологов (Иванов, 1983; Ефремов, Балдаев, 1985; Корнеев и др., 2010), которыми определен видовой состав орнитофауны, основные биотопы как среда местообитания видов, некоторые закономерности изменения их численности.

Широкий круг вопросов, включая современные методики исследований, динамику, гнездование, размножение, миграции и пространственную ориентацию, голосовые особенности, болезни, влияние климатических и антропогенных факторов, мониторинг популяций различных видов орнитофауны, рассмотрен участниками 1 Всероссийского орнитологического конгресса (Первый всероссийский орнитологический конгресс, 2018). Материалы исследований, представленные участниками конгресса, свидетельствуют о широте и глубине поднимаемых вопросов и проблем, связанных с учетом и динамикой численности орнитофауны, охраной среды обитания, сохранением биоразнообразия, необходимости учета в хозяйственной деятельности биологических и экологических особенностей, организации мониторинга популяций видов, населяющих территорию России.

Из многочисленной иностранной литературы следует выделить работу ученых-орнитологов Великобритании (Catchpole, Slater, 2008), в которой на основе обширного экспериментального материала с привлечением данных других авторов раскрыты структура пения многих птиц, причинно-следственные связи пения птиц с их поведенческими реакциями, погодными условиями, конкурентными внутривидовыми и межвидовыми взаимоотношениями. Для нашей работы это имеет важное значение при определении видового состава птиц по голосам.

На основании многочисленных и детальных исследований орнитофауны регионов России и за рубежом составлены определители (Вепринцев и др., 2007), энциклопедические перечни, описания, ареалы распространения видов, обитающих в различных природно-климатических условиях (Barnard, Thompson, 2013, Harrison, 2000; Makatsch, 1974, 1976),

позволяющие в необходимых случаях обращаться к ним для получения дополнительных сведений о том или ином виде.

Цель работы – определение видового состава и численности орнитофауны, не отнесенной к объектам охоты, в основных лесных биотопах на территории Республики Марий Эл. Практическая значимость работы заключается в получении информации о видовом разнообразии, составе и численности видов орнитофауны, не отнесенных к объектам охоты, в условиях лесных биотопов как основы для выработки практических мер по их охране и поддержанию численности.

Объекты и методика исследований. Исследованиями охвачены основные лесные биотопы пяти муниципальных районов Республики Марий Эл (Медведевского, Килемарского, Звениговского, Моркинского, Мари-Турекского), территории которых согласно физико-географическому районированию (Физико-географическое районирование Среднего Поволжья, 1964; Энциклопедия Республики Марий Эл, 2009) входит в состав Марийской низменности (Марийского Полесья) и Вятско-Камской возвышенности (Марийско-Вятский увал). Данная территория представлена сосновыми борами, смешанными елово- и сосново-лиственными насаждениями. Елово-пихтовые леса с элементами широколиственных лесов встречаются фрагментарно. Лесистость территорий исследуемых районов составляет от 32 % (Мари-Турекский район) до 80 % (Килемарский район).

Орнитологические исследования проводились в течение 2011-2017 годов и охватывают наиболее типичные лесные биотопы, сходные по ряду признаков. При характеристике биотопов использован лесоводственный подход с описанием лесных биотопов по обобщенным лесоводственным показателям. В качестве основных биотопов определены лесные участки хвойных молодняков, спелых смешанных насаждений с преобладанием ели и сосны, прибрежные зоны (пойменные дубравы). Общая площадь исследуемых лесных участков, включая прибрежные зоны, составила около 5 тысяч гектар.

Учет видового состава и численности птиц проводился в весенне-летний период в ясные солнечные дни, при температуре воздуха от 18 °С до 24 °С в утренние часы (когда наблюдается наибольшая голосовая активность птиц) на орнитологических маршрутах (Равкин, Доброхотов, 1963; Равкин, 1967, 1986; Степанян, 1990), при этом учитывались все встречи с птицами. При возникновении трудностей в определении вида использовались фотофиксация с последующим определением по определителям, а также сравнение записанных на аудиофиксацию голосов птиц с аналогичными видами из фонотеки голосов животных им. проф. Б.Н. Вепринцева (Вепринцев и др., 2007).

Расстояние до встречаемых на учете птиц определялось в момент обнаружения, когда птица только увидена или услышана, по прямой между учетчиком и птицей (группой птиц).

Во время учетов оценивалось пройденное расстояние в километрах и чистое время учета в часах. Расчет плотности населения птиц выполнен для каждого из учтенных видов в отдельности по следующей формуле:

$$N \text{ вида} = (n_1 \times 40) + (n_2 \times 10) + (n_3 \times 3) / L, \quad (1)$$

где N вида – количество особей на 1 км²; n_1 – n_3 – число особей, зарегистрированных в полосах обнаружения соответственно 0-25 м, 25-50 м, 50-100 м и более; 40, 10, 3 – пересчетные коэффициенты; L – учетный километраж (в километрах).

Для сравнительной оценки видового разнообразия нами использованы:

а) индекс оценки вероятности принадлежности любых двух особей, случайно отобранных из неопределенно большого сообщества, к разным видам как показатель доминирования – индекс *Симпсона* (2)

$$D_s = 1 - \sum_{i=1}^s \frac{n_i^2}{N}, \quad (2)$$

где, n – число особей i -го вида;

N – число особей в пробе.

б) индекс определения вероятности наступления цепи событий – индекс разнообразия Шеннона:

$$H = -\frac{1}{\lg 2} \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \lg \frac{n_i}{N}, \quad (3)$$

где n – число особей i -го вида;

S – число видов;

N – число особей в пробе.

Расчеты индексов биоразнообразия выполнены с использованием компьютерной программы «Statistica», разработанной В.Л. Тороповым применительно к определению показателей биологического разнообразия и представленной кафедрой зоологии Марийского государственного университета.

Результаты исследований. Как показывают результаты учетов, в зависимости от условий местообитания формируется различный состав. В процентном отношении наибольшую долю от общего числа учтенных видов (47) занимают представители семейства Славковые (Sylvidae) – 19 %, далее идут представители семейства Дроздовые (Turdinae) и Трясогузковые (Motacillidae) – по 11 %, Вьюрковые (Fringillidae) – 8 %, Дятловые (Picidae) и Синицы (Paridae) – по 6%. Доля семейств Мухоловковые (Muscicapidae), Вороновые (Corvidae), Жаворонковые (Alaudidae) составляет по 4 % от общего числа видов. Число видов других семейств составляет по 2 % каждого учтенного семейства (рис.1).

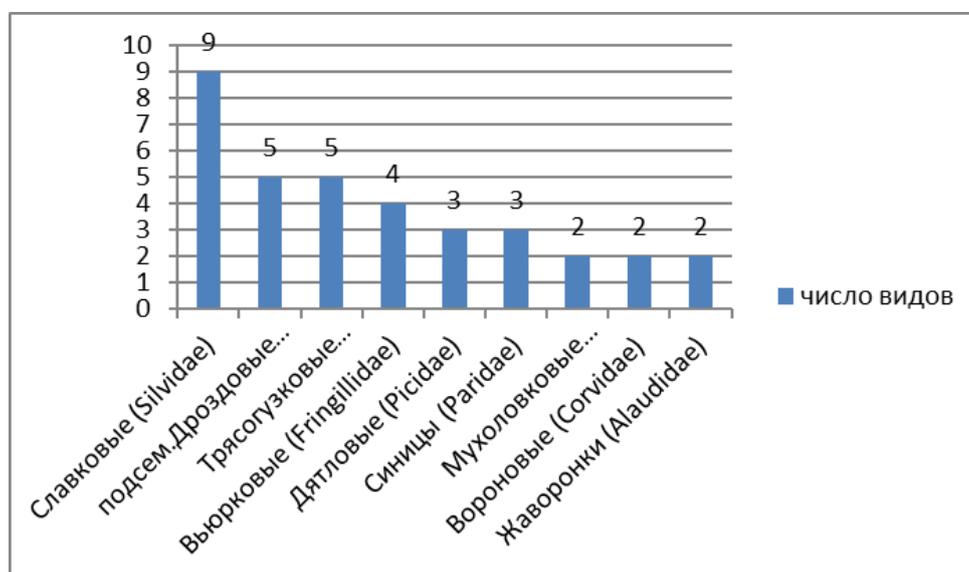


Рис.1. Распределение общего числа видов в исследуемых районах по семействам

Примечание. Семейства Голубеобразные (Columbidae), Иволги (Oriolidae), Ткачиковые (Ploceidae), Крачки (Sternidae), Кукушки (Cuculidae), Ласточки (Hirundinidae), Овсянковые (Emberizidae), Поползни (Sittidae), Ржанковые (Charadriidae), Скворцы (Sturnidae), Совы (Strigidae), Стрижи (Frodidae) представлены по одному виду.

Условия местообитания птиц в лесных биотопах определяются совокупностью целого ряда факторов, образующих сложный экологический комплекс, среди которых основными являются климатические и погодные условия, характер растительности, в т.ч. водной, определяющей кормовые, защитные и гнездопригодные условия для пернатых.

Как показали наши исследования, видовой состав орнитофауны лесных, околородных биотопов и прилегающих к ним территорий весьма различен и в основном, сосредоточен в опушечной части лесных биотопов, сложных по своей структуре – на участках древесно-кустарниковой растительности, чаще смешанного состава (сосна, береза, ель, дуб, осина, ольха, ива, крушина и т.п.) и травянистой растительности, наличием подлеска, с высокой или средней вертикальной и горизонтальной сомкнутостью и чередующихся с участками открытых пространств (полянами).

Густота подлеска и подроста здесь является одним из определяющих факторов. В таких условиях отмечены наибольшее видовое разнообразие и высокая плотность орнитофауны (10 - 25 видов).

В хвойных молодняках, а также в прибрежных зонах без древесно-кустарниковой и травянистой растительности, встречается наименьшее количество видов – от 4 до 8. В то же время в лесных биотопах, прилегающих к водоемам, отмечено относительно высокое видовое разнообразие орнитофауны, в котором наряду с лесными видами в опушечной части или по границе с водоемом встречаются виды открытых пространств, такие как озерная чайка (*Larus ridibundus*), белая трясогузка (*Motacilla alba*), деревенская ласточка (*Hirundo rustica*), черная крачка (*Chlidonias nigra*).

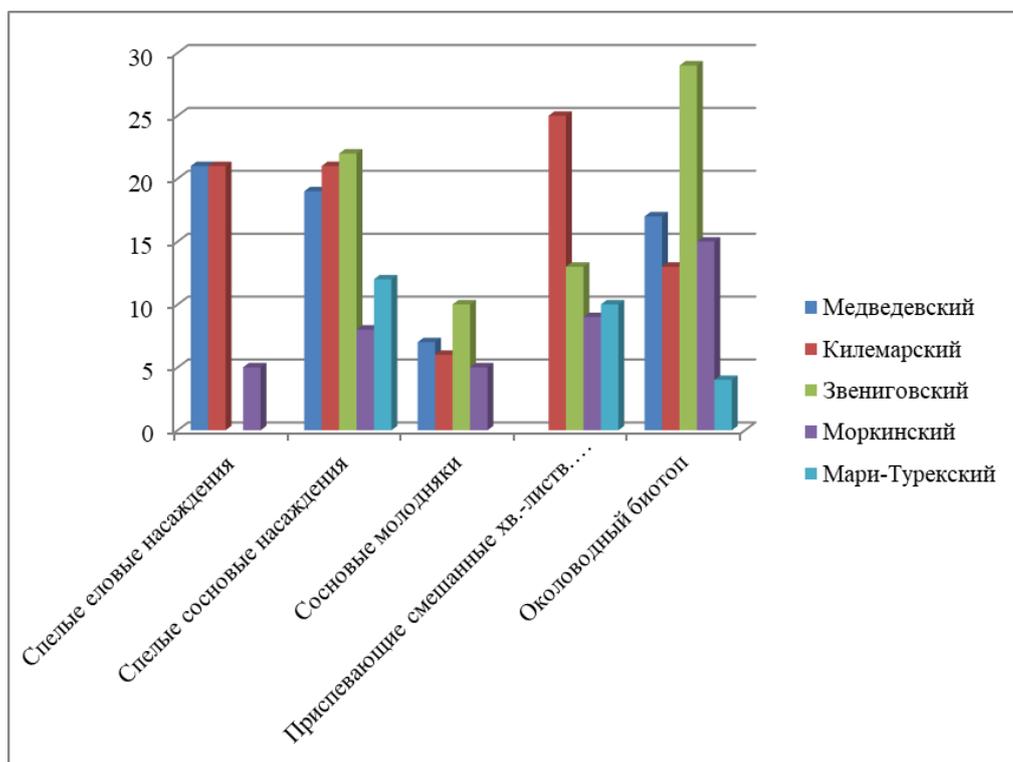


Рис.2. Распределение числа видов в основных биотопах исследуемых районов

Наибольшее количество видов учтено в смешанных хвойно-лиственных и хвойных насаждениях с преобладанием сосны или ели, а наименьшее – в хвойных молодняках с преобладанием сосны, однако в пределах сходных по обобщенным показателям условиям обитания, но в разных районах, наблюдаются различия в количестве учтенных здесь видов. Так, например, в хвойных насаждениях с преобладанием ели или сосны в Медведевском и Килемарском районах учтено от 18 до 22 видов, а в относительно аналогичных условиях Моркинского района – от 4 до 7 видов. Данные расхождения можно объяснить влиянием некоторых других факторов, в том числе вероятным нахождением хищных видов птиц и мелких млекопитающих.

Обращает на себя внимание факт резкого увеличения в усохших после 2010 года ельниках численности большого пестрого дятла, отмеченного особенно в Моркинском районе в 2015 году – плотность вида составила до 6 до 20 шт/км² (максимальная – в лесных биотопах с участками усыхающей ели), что объясняется наличием очагов массового заселения усохших деревьев ели энтомовредителями, составляющими в этот период основную кормовую базу для дятлов.

В околородных лесных биотопах и прибрежных зонах всего выявлен 41 вид (видовые названия приведены по Л.С.Степанян (1990), из которых наиболее распространенными являются серая ворона (*Corvus cornix*) – от 10 до 300 шт/км², деревенская ласточка (*Hirundo rustica*) – 40-208 шт/км², белая трясогузка (*Motacilla alba*) – 154-400 шт/км², полевой воробей (*Passer montanus*) – до 208 шт/км². Такая численность не является строго закономерной, однако она относительно оказалась выше, чем в некоторых других биотопах.

Меньшее разнообразие отмечено по таким видам, как лесной конек (*Anthus trivialis*) – плотность до 123 шт/км², желтая трясогузка (*Motacilla flava*) – до 100 шт/км², черная крачка (*Chlidonias nigra*) – 10-50 шт/км², луговой чекан (*Saxicola rubetra*) и полевой жаворонок (*Alauda arvensis*) – до 46 шт/км², речная крачка (*Sterna hirundo*) – 14-30 шт/км².

У таких видов, как серая цапля (*Ardea cinerea*), речной сверчок (*Locustella fluviatilis*), полевой конек (*Anthus campestris*), обыкновенная овсянка (*Emberica citrinella*), коростель (*Crex crex*) отмечены единичные представители.

Прибрежная древесно-кустарниковая растительность околородных лесных биотопов является определяющим фактором, влияющим на видовой состав и плотность орнитофауны. Наличие здесь небольших участков насаждений или единичных деревьев с хорошо развитым подлеском и живым напочвенным покровом создает необходимые для птиц условия и повышают видовое разнообразие и численность птиц.

Из дневных хищников отмечены черный коршун (*Milvus migrans*), канюк (*Buteo buteo*), ястреб-тетеревятник (*Accipiter gentilis*). Их плотность составила в среднем от 0,4 шт/км² до 1,4 шт/км², что соответствует среднестатистическим показателям для наших условий.

Наибольшее видовое разнообразие и плотность птиц отмечены в лесных биотопах пойм рек Илеть и Большой Кундыш, где в пойменных дубравных биотопах выявлено соответственно 30 и 24 видов, а наибольшую плотность заселения показали такие виды, как белая трясогузка (*Motacilla alba*) – 129 шт/км², зяблик (*Fringilla coelebs*) – 100 шт/км², пеночка-теньковка (*Phylloscopus collybita*), дрозд-рябинник (*Turdus pilaris*), полевой воробей (*Passer montanus*) – до 86 шт/км², синица-московка (*Parus ater*) – 57 шт/км². Такая плотность объясняется сложной структурой насаждений смешанного состава с хорошо развитым подлеском и подростом, создающих достаточно хорошие гнездопригодные, кормовые и защитные условия.

Соотношение численности видов орнитофауны и индексов биоразнообразия по основным биотопам представлено в таблице.

Сравнение индексов биоразнообразия в различных биотопах не показывает четко выраженных тенденций изменения видового разнообразия орнитофауны, однако в пределах более или менее однородных лесных биотопов показатели относительно сравнимы между собой. Приведенные расчеты свидетельствуют о различиях в оценке видового разнообразия орнитофауны, которое обусловлено приведенными выше факторами. С увеличением числа видов в биотопах максимальные значения обоих показателей, в особенности индекса Шеннона, увеличиваются. По результатам исследований биологического разнообразия принято считать, что индекс Симпсона обычно придаёт большее значение постоянно встречающимся, обычным видам, а индекс Шеннона увеличивает значимость редких видов.

Число видов орнитофауны и видовое разнообразие орнитофауны в основных лесных биотопах, рассчитанное с использованием коэффициентов Симпсона и Шеннона

Административный район	Показатели	Основные биотопы				
		Приспевающие хвойные насаждения	Спелые сосновые насаждения	Сосновые молодняки	Спелые смешанные хвойно-лиственные насаждения	Околоводный лесной биотоп
Медведевский	Число видов	21	19	7	-	17
	Индекс Симпсона	0,89	0,92	0,79	-	0,73
	Индекс Шеннона	3,65	3,85	2,38	-	2,85
Килемарский	Число видов	21	21	6	25	13
	Индекс Симпсона	0,73	0,92	0,82	0,78	0,89
	Индекс Шеннона	2,94	3,93	2,52	2,66	3,41
Звениговский	Число видов	-	22	10	13	29
	Индекс Симпсона	-	0,87	0,79	0,88	0,94
	Индекс Шеннона	-	3,46	2,58	3,27	4,34
Моркинский	Число видов	5	8	5	9	15
	Индекс Симпсона	0,62	0,85	0,80	0,81	0,89
	Индекс Шеннона	1,74	2,79	2,57	2,66	3,48
Мари-Турекский	Число видов	10	10	-	6	5
	Индекс Симпсона	0,66	0,81	-	0,74	0,71
	Индекс Шеннона	2,31	2,83	-	2,25	2,01

Заключение. Видовой состав орнитофауны, не отнесенной к объектам охоты, формируется в зависимости от условий местообитания, которые наряду с климатическими и погодными условиями, определяются структурой и характером древесно-кустарниковой растительности.

Видовой состав и плотность заселения птицами лесных, околоводных биотопов и прилегающих к ним территорий весьма различны и в основном сосредоточены в опушечной части лесных биотопов, сложных по своей структуре, чаще смешанного (хвойно-лиственные) состава с наличием подлеска, высокой или средней вертикальной и горизонтальной сомкнутостью и чередующихся с участками открытых пространств (полями). Одним из определяющих факторов является густота подлеска. В таких условиях отмечены наибольшее видовое разнообразие и высокая плотность орнитофауны, особенно мелких птиц.

Наибольшее количество видов учтено в смешанных хвойно-лиственных и хвойных насаждениях с преобладанием сосны или ели, а наименьшее – в хвойных молодняках с преобладанием сосны, однако в пределах сходных по обобщенным показателям условиям обитания, но в разных районах, наблюдаются различия в количестве учтенных здесь видов.

В процентном отношении наибольшую долю от общего числа учтенных видов (47) занимают представители семейства Славковые (*Sylvidae*), далее (по степени уменьшения доли) идут представители семейства Дроздовые (*Turdinae*) и Трясогузковые (*Motacillidae*), Вьюрковые (*Fringillidae*), Дятловые (*Picidae*) и Синицы (*Paridae*). Доля семейств Мухоловковые

(*Muscicapidae*), Вороновые (*Corvidae*), жаворонковые (*Alaudidae*) составляет по 4 % от общего числа видов. Число видов других семейств составляет по 2 % каждого учтенного семейства

Учтенные виды орнитофауны при установленной их плотности можно уверенно отнести к наиболее типичным и многочисленным для условий лесных районов республики. Единичные представители отдельных семейств, установленные в ходе натуральных исследований, целесообразно отнести к редким и малочисленным, следовательно, необходимо определить меры по их сохранению, включая охрану среды их обитания.

Оценка видового разнообразия орнитофауны в лесных биотопах республики имеет важное прикладное значение: оно дает представление о состоянии лесных экосистем в части одного из ее компонентов – орнитофауны и может служить основой для ведения системы менеджмента видов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства природных ресурсов, экологии и охраны окружающей среды Республики Марий Эл.

Библиографический список

1. Алексеев, И.А. Интегрированная система защиты леса /И.А.Алексеев, О.Н.Гусева. И.П.Курненкова, Е.Н.Чешуин. – Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, 2013. – 416 с.
2. Очерки о животных Марийской АССР / сост. Н. В. Иванов. – Йошкар-Ола: Марийск. книж. изд-во, 1983. – 148 с.
3. Ефремов, П.Г. Животный мир Марийской АССР. Птицы / П.Г.Ефремов, Х.Ф.Балдаев. – Йошкар-Ола: Марийск. книжн. изд-во, 1985. – 158 с.
4. Корнеев, В.А. Отчет о научно-исследовательской работе «Видовой состав, численность и состояние популяций позвоночных животных (за исключением объектов, отнесенных к объектам охоты, а также водных биологических ресурсов) в Юринском и Горномарийском районах Республики Марий Эл / В. А. Корнеев, В. А. Забиякин, П. В. Бедова и др. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. – 70 с.
5. Физико-географическое районирование Среднего Поволжья /под редакцией А.В.Ступишина. – Казань: Издательство Казанского университета, 1964. – 196 с.
6. Энциклопедия Республики Марий Эл. – Йошкар-Ола, 2009. – С. 49-80.
7. Равкин, Ю.С. К методике учета птиц лесных ландшафтов во внегнездовое время / Ю.С.Равкин, Б.П.Доброхотов // Организация и методы учета птиц и вредных грызунов. – Москва, 1963. – С. 130-136.
8. Равкин, Ю.С. К методике учета птиц в лесных ландшафтах / Ю.С. Равкин // Природа очагов клещевого энцефалита на Алтае. – Новосибирск, 1967. – С. 66-75.
9. Равкин, Ю.С. Сезонная динамика показателей видового разнообразия населения птиц смешанных лесов Подмосковья. Актуальные проблемы орнитологии / Ю.С. Равкин. – Москва: Наука, 1986. – С. 235-239.
10. Степанян, Л.С. Конспект орнитологической фауны СССР / Л.С. Степанян. – Москва: Наука, 1990. – 728с.
11. Вепринцев, Б.Н. Голоса птиц России. Часть 1. Европейская Россия, Урал, Западная Сибирь /Б.Н.Вепринцев, О.Д.Вепринцева, В.К.Рябицев и др.) / Звуковой справочник-определитель/mp3/ Фонотека голосов животных им. проф. Б.Н.Вепринцев. – Пушкино, Москва, Екатеринбург, 2007.
12. Первый всероссийский орнитологический конгресс [Электронный ресурс]. – URL: <http://zoomet.ru/konferencii/I-Vserossijskij-ornitologicheskij-kongress-2018.pdf> - 30.05.2019
13. Catchpole, C.K. Bird Song - Biological Themes and Variations [Electronic resource] / C.K.Catchpole, P.J.B. Slater. – 2008. – 348 p. – URL: <https://yadi.sk/i/Be9pvJk0qeXh8>. 15.05.2019
14. Harrison, C. Birds of the World (Dorling Kindersley) [Electronic resource] / C. Harrison, A. Greensmith.– 2000. – 422 p. – URL: <https://zoomet.ru/ptica.html?start=1>. – 15.05.2019.
15. Makatsch, W. Die Eier der Vogel Europas. Band 1 [Electronic resource]. – 1974. – 468 p. – URL: https://yadi.sk/i/y3aCW_SZqeZQ9. – 17.05.2019
16. Makatsch, W. Die Eier der Vogel Europas.. Band 2 [Electronic resource]. – 1976. – 460 p. – URL: <https://yadi.sk/i/IsUsIKOFqeZTG>, 19.05.2019.
17. Barnard, C.J. Gulls and Plovers - The Ecology and Behaviour of Mixed-Species Feeding Groups / C.J. Barnard, D.B. Thompson. – 2013. – 302 p. – URL: <https://yadi.sk/i/tbylg06PqebW5>, 25.05.2019

References

1. Alekseev I.A., Guseva O.N., Kurnenkova I.P., Cheshuin E.N. Integrirovannaja sistema zashhity lesa [Integrated Forest Protection System], Yoshkar-Ola: Marijskij gosudarstvennyj universitet, 2013, 416 p.
2. Ocherki o zhivotnyh Marijskoj ASSR [Essays on animals of the Mari ASSR], sost. N. V. Ivanov, Yoshkar-Ola: Marijsk. knizh. izd-vo, 1983, 148 p.

3. Efremov P.G., Baldaev H.F. Zhivotnyj mir Marijskoj ASSR. Pticy [The animal world of the Mari ASSR. Birds], Yoshkar-Ola: Marijsk. knizhn. izd-vo, 1985, 158 p.
4. Korneev V.A., Zabijakin V. A., Bedova P. V. i dr. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote «Vidovoj sostav, chislennost' i sostojanie populjacij pozvonocnyh zhivotnyh (za iskljucheniem ob#ektov, otnesennyh k ob#ektam ohoty, a takzhe vodnyh biologicheskikh resursov) v Jurinskom i Gornomarijskom rajonah Respubliki Marij Jel [Report on research work "The species composition, number and condition of vertebrate animal populations (with the exception of objects classified as objects of hunting, as well as aquatic biological resources) in the Yurinsky and Gornomarijsky districts of the Republic of Mari El], Joshkar-Ola: MarGTU, 2010, 70 p.
5. Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie Srednego Povolzh'ja [Physical-geographical zoning of the Middle Volga], pod redakciej A.V.Stupishina, Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta, 1964, 196 p.
6. Jeciklopedija Respubliki Marij Jel [Encyclopedia of the Republic of Mari El], Joshkar-Ola, 2009, pp.49-80.
7. Ravkin Ju.S., Dobrohotov B.P. K metodike ucheta ptic lesnyh landshaftov vo vnegnezdovoe vremja [On the methodology for recording birds of forest landscapes during non-breeding time], *Organizacija i metody ucheta ptic i vrednyh gryzunov* [Organization and methods of accounting for birds and harmful rodents], Moscow, 1963, pp. 130-136.
8. Ravkin Ju.S. K metodike ucheta ptic v lesnyh landshaftah [To the methodology of accounting for birds in forest landscapes], *Priroda ochagov kleshhevoogo jencefalita na Altae* [The nature of the centers of tick-borne encephalitis in Altai], Novosibirsk, 1967, pp.66-75.
9. Ravkin Ju.S. Sezonnaja dinamika pokazatelej vidovogo raznoobrazija naselenija ptic smeshannyh lesov Podmoskov'ja [Seasonal dynamics of indicators of species diversity of the bird population of mixed forests near Moscow], *Aktual'nye problemy ornitologii* [Actual problems of ornithology], Nauka, 1986, pp.235-239.
10. Stepanjan L.S. Konspekt ornitologicheskoi fauny SSSR [Abstract of the ornithological fauna of the USSR], Moscow, Nauka, 1990, 728 p.
11. Veprincev B.N., Veprinceva O.D., Rjabicev V.K. i dr. Golosa ptic Rossii. Chast' 1. Evropejskaja Rossija, Ural, Zapadnaja Sibir' [The voices of the birds of Russia. Part 1. European Russia, the Urals, Western Siberia], *Zvukovoj spravocnik-opredelitel'*, mp3, *Fonoteka golosov zhivotnyh im. prof. B.N.Veprincev* [Sound guide-determinant, mp3, Library of animal voices named after prof. V.N. Veprintsev], Pushhino, Moskva, Ekaterinburg, 2007.
12. Pervyi vserossiiskii ornitologicheskii kongress [The First All-Russian Ornithological Congress], URL: <http://zoomet.ru/konferencii/I-Vserossiiskij-ornitologicheskij-kongress>
13. Catchpole C.K., Slater P.J.B. Bird Song - Biological Themes and Variations, URL: <https://yadi.sk/i/Be9pvJk0qeXh8>. 15.05.2019
14. Harrison C., Greensmith A. Birds of the World (Dorling Kindersley), URL: <https://zoomet.ru/ptica.html?start=1>, 15.05.2019.
15. Makatsch W. Die Eier der Vogel Europas, Band 1, URL: https://yadi.sk/i/y3aCW_SZqeZQ9, 17.05.2019
16. Makatsch W. Die Eier der Vogel Europas, Band 2, URL: <https://yadi.sk/i/IsUsIKOFqeZTG>, 19.05.2019.
17. Barnard C.J., Thompson D.B. Gulls and Plovers - The Ecology and Behaviour of Mixed-Species Feeding Groups, URL: <https://yadi.sk/i/tbyIg06PqebW5>, 25.05.2019

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСУШЕНИЯ БОЛОТА «КУПЛАНГСКОЕ» РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ

А. В. Кусакин, Т. Н. Ефимова, Т. Е. Шведова

Поволжский государственный технологический университет

*В статье изложены результаты исследования части олиготрофного лесного болота, осушенного с целью сохранения и окультуривания естественных клюквенников. Исследования проводились в полевых условиях с использованием проектно-сметной документации создания объекта и материалов лесоустройства. Болото «Куплангское» было признано особо охраняемой природной территорией – памятником природы и отнесено к категории «комплексно-ландшафтный». Таким образом, площадь, на которой построена мелиоративная и дорожная системы, вошли в особо охраняемую природную территорию. Установлено, что плантация, созданная для выращивания высоких урожаев клюквы, не выполняет свою первоначальную функцию, мелиоративная система без проведения ремонтных работ разрушается и каналы относятся по степени повреждения от слабоповрежденных до среднеповрежденных. Урожайность клюквы снижается пропорционально увеличению сомкнутости полога древостоев, произрастающих на болоте. Установлено, что непосредственно вблизи мелиоративных каналов сомкнутость полога древостоя составляет 0,8 и этому показателю соответствует наименьшая степень проективного покрытия, наибольшая степень проективного покрытия наблюдается при сомкнутости древостоя 0,3 и, естественно, на открытых полянах. Сосняки (*Pinus Sylvestris*) на клюквенных болотах при относительной полноте насаждения 0,3-0,4 по санитарной характеристике относятся к находящимся в стадии разрушения, что связано со значительным патологическим отпадом, который превышает нормальный уровень естественного изреживания леса в 5-12 раз. При увеличении расстояния от канала урожайность клюквы возрастает, и оптимальным расстоянием можно с достоверностью назвать 65-75 м. Процесс уменьшения клюквы с проективным покрытием 30-50 % возрастает, общая площадь, занятая клюквенниками, на исследуемых объектах уменьшится на 30 % и составит через 20-30 лет около 20 % от общей площади участков.*

Ключевые слова: болото, осушение, мелиоративная система, клюква, сосна, таксационное описание, эффективность.

THE EFFICIENCY OF DRYING THE SWAMP KUPANSKOE OF THE REPUBLIC OF MARI EL

A. V. Kusakin, T. N. Efimova, T. E. Shvedova

Volga State University of Technology

The article presents the results of a study of part of the oligotrophic forest swamp drained in order to preserve and cultivate natural cranberries. The studies were carried out in the field using design estimates for the creation of the object and forest inventory materials. The "Kuplangskoye" swamp was recognized as a specially protected natural area - a natural monument and was categorized as "complex landscape" by the Decree of the Council of Ministers of the Mari ASSR from 15.07.1987. No. 353 "On state natural monuments of the Mari ASSR." Thus, the area on which the reclamation and road systems are built are included in a specially protected natural area. It was established that the plantation created for growing high yields of cranberries does not fulfill its initial function, the reclamation system is destroyed without repairs and the canals are damaged by slightly damaged to moderately damaged ones - the cranberry yield decreases in proportion to the increase in the canopy density. It was determined that, right near the canals, the canopy density of the stand is 0.8, and this indicator corresponds to the lowest degree of projective cover, the highest degree of projective cover is observed at a closure of 0.3 and naturally in open glades. The process of reducing cranberries with a projective cover of 30-50% is increasing, the total area occupied by

cranberries at the studied sites will decrease by 30% and in 20-30 years will be about 20% of the total area of the plots.

Keywords: swamp, drainage, reclamation system, cranberry, pine, taxation description, efficiency.

Введение. Роль болотных экосистем в природе и экономике довольно значительна: выполнение функции «почек» планеты, выращивание леса и сельскохозяйственных культур, получение органических удобрений, топлива и ряда химических веществ из торфа, сбор ягод и лекарственных растений. Необычайно велико научное и научно-познавательное, а также культурно-историческое, санитарно-оздоровительное, рекреационное значение болот (Боч, 1979; Вомперский, 1989). Тем не менее, самым большим богатством болот является торф – кладовая депонированного углерода, широко используется в промышленности, сельском хозяйстве и других отраслях народного хозяйства (Пьявченко, 1985; Демаков и др, 2006; Naumov, 2011). Предприняты попытки дать количественные характеристики некоторым компонентам болот: размер площадей болот, дебит родников и ручьев, урожайность ягодников или занимаемая ими площадь и т.д., а кроме того систематизировать сами функции болот (Adamus, Stockwell, 1983; Gervais et al., 2017; Michalecka et al, 2017).

Вопросами рационального использования ресурсов болот ученые всего мира занимаются на протяжении многих десятилетий. Скандинавские и североамериканские страны, осознавая, что болота являются источником не только торфяных, но и растительных ресурсов, проводят активное культивирование болотных ягод. Клюква крупноплодная (*Oxycoccus macrocarpus* (Ait.) Pursh) выращивается в Северной Америке уже более сотни лет (Cranberry Grower's..., 2000, Zampella et al., 2008). Сейчас плантации этой клюквы успешно плодоносят в странах Балтии, в Белоруссии и на Украине.

Целью настоящей работы является изучение современного состояния осушенного участка верхового болота «Куплангское» и определение влияния осушения на состояние древесной растительности и продуктивность клюквенников на исследуемых участках.

Объекты и методика исследований

Основанием для проведения изыскательских работ по созданию плантаций клюквы и брусники в Кокшайском и Дубовском мехлесхозах послужил план проектно-изыскательских работ 1983 года и задание на проектирование, выданное Министерством лесного хозяйства Марийской АССР 18 февраля 1983 года в соответствии с приказом Министерства лесного хозяйства РСФСР № 427 от 21.12.1980 г. «О создании клюквенных плантаций на предприятиях лесного хозяйства».

В результате подбора и анализа обследованных участков и проектно-изыскательских работ для создания плантации были отобраны 2 участка в 10,5 км на юго-восток от пос. Визимьяры Килемарского района: 1 участок – в 124 кв. Визимьярского лесничества, 2 участок – в 71 кв. Куплангского лесничества. Оба участка расположены на болоте «Куплангское». Участки были объединены одной мелиоративной системой.

Болото Куплангское расположено на третьей надпойменной террасе реки Волги в пределах водораздельного пространства рек Арда и Б. Кундыш. Площадь этого болотного массива состоит из 16 обособленных участков и представлена всеми типами торфяной залежи. Наиболее распространены торфяные залежи верхового (58 %) и низинного (30 %) типов.

Болото облесено. В древесном ярусе преобладают сосна и береза, кустарничковый ярус представлен багульником, миртом болотным, подбелом, а также клюквой, черникой и голубикой. Моховой сфагновый ярус сплошной, травянистые растения представлены пушицами и осоками. На территории болота имеется 6 озер общей площадью 134 га (Посьяр, Васьяр,

Мояр, Изъяр, Визимьяр). Из южной части массива вытекает река Парат, кроме этого из болота берут свое начало еще три ручья.

Постановлением Совета Министров Марийской АССР от 15.07.1987. №353 «О государственных памятниках природы Марийской АССР», болото «Куплангское» было признано особо охраняемой природной территорией – памятником природы и отнесено к категории «комплексно-ландшафтный». В перечне памятников природы республиканского значения, утвержденном постановлением Правительства Республики Марий Эл от 04.06.2014 № 284 «Об особо охраняемых природных территориях республиканского значения Республики Марий Эл», болото Куплангское, площадью 5778,4 га определено как комплексное (Кусакин, 2000, Ефимова, 2018). Таким образом, площадь, на которой построена мелиоративная и дорожная системы, вошли в особо охраняемую природную территорию.

При исследовании болота Куплангское и непосредственно гидромелиоративной системы использовались архивные материалы, данные лесоустройства. Для изучения закономерностей формирования породного состава и временной динамики древостоев была проведена выборка из таксационных описаний насаждений, расположенных на лесоболотном массиве «Куплангское».

Детальное изучение состояния древостоев выполняли на 10 постоянных пробных площадях. Все работы проводились в соответствии с ОСТ 56-69-83 и «Программой и методикой биогеоценологических исследований». Для мониторинга олиготрофных и мезотрофных болот с наличием клюквенных зарослей на модельном участке сделано следующее:

1. Заложены постоянные ленточные трансекты, шириной 1 м с шагом в 50 м (рис. 1). Учетная точка представляет собой сетку-квадрат размером 1м², разделенную на 100 частей.

2. В каждой точке наблюдения снимались следующие показатели:

- сомкнутость полога древостоя в радиусе 5 метров от учетной площадки, его состав;
- проективное покрытие клюквы;
- число ягод, выборочно размер, форма;

Для определения урожайности проводился сплошной сбор ягод с учетной площадки с дальнейшим их взвешиванием на специальных весах и пересчетом на 1 га.

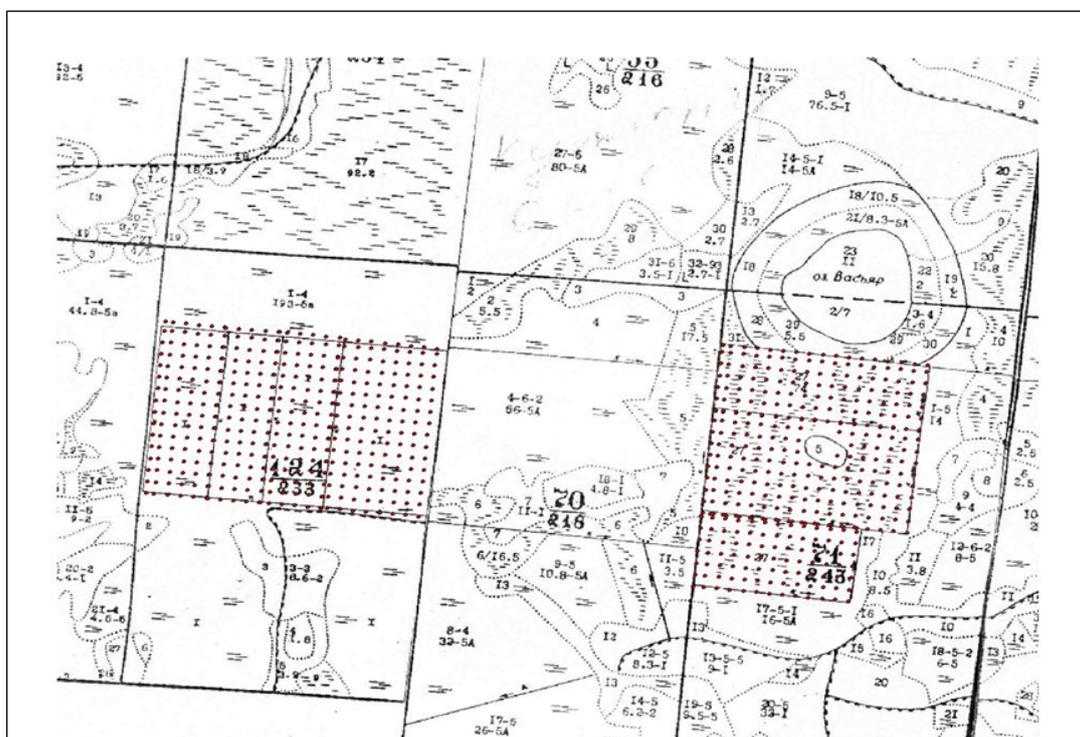


Рис. 1. Пункты наблюдений на объекте исследования

3. Описан видовой состав живого напочвенного покрова (ЖНП) с установлением обилия и степени покрытия поверхности почвы по шкале Друде.

Статистическую обработку данных и регрессионный анализ проводили на ПК с использованием пакетов стандартных прикладных программ.

Мелиоративная система для окультуривания естественных клюквенников по вышеупомянутому проекту, представляющая объект нашего исследования, была построена в 1986-1987 годах Суслонгерской ЛММС. Техническая характеристика участков на момент строительства приведена в таблице 1.

Таблица 1

Техническая характеристика участков

№ п/п	Наименование	Ед. измерения	Участок № 1	Участок № 2	Итого	%%
1	Каналы				14,47	
1.1	регулирующие, 0	км	2,93	4,31	7,24	
1.2	сбросные, КС	км	2,09	3,16	5,25	
1.3	накопительные, КР	км	1,07	0,91	1,98	
2	Проезды вдоль каналов	км	3,55	4,50	8,05	
3	Регуляторы – проезды трубчатые	шт	-	4	4	
4	Проезды трубчатые	шт	-	4	4	
5	Пешеходные мостики	шт	-	8	8	
6	Илоотстойники	шт	-	5	5	
7	Противопожарные водоемы	шт	-	2	2	
8	Смотровые колодцы	шт	3	3	6	
9	Автомобильная дорога с щебеночным покрытием	км			3,4	
10	Площадь, в т. ч.	га	85,9	82,9	168,8	100
11	Клюква 50 % и более	га	0,4	0,2	0,6	0,4
12	Клюква 30-50 %	га	75,6	72,8	148,4	87,9
13	Клюква 20-30 %	га	0,2	-	0,2	0,1
14	Каналы внутри участка	га	1,0	1,0	2,0	1,2
15	Каналы за участком	га	3,1	2,7	5,8	3,4
16	Дороги внутри участка	га	1,6	1,6	3,2	1,9
17	Дороги за участком	га	4,0	3,6	7,6	4,5
18	Озера	га	-	1,0	1,0	0,8

Из данных таблицы видно, что общая площадь территории с мелиоративной системой составляет 168,8 га. Клюквенники с проективным покрытием 30-50 % занимают 88,3 % от её площади. С вычетом каналов, дорог и озер продуцирующая площадь составляет 149,2 га. Проективное покрытие – проекция надземных частей растения на поверхность площадки, выражаемая в процентах.

В 1984 году участки представляли собой болото верхового типа с насаждениями сосны 6 класса возраста, Va класса бонитета, сомкнутость крон 0,5-0,6, в возрасте 80-120 лет, высота подроста сосны составляла 1-3 м, в напочвенном покрове преобладали сфагновые мхи, клюква, багульник, голубика, пушица. После создания проекта сохранения и использования естественных зарослей клюквы Куплангского болота 72,8 % от общей площади болота занимали клюквенники с покрытием свыше 30 % (Шабалова, Софрина, 1989).

Изучение изменения растительности под влиянием мелиорации нами проведено через 12 лет после осушения. Характеристика участков и состояние мелиоративной сети представлено ниже. **Участок № 1** – участок в 124 кв. Визимьярского лесничества. Площадь участка 85,9 га. На этом участке осушительные каналы ориентированы с севера на юг. Количество каналов на участке равно 5, на севере расположен накопительный канал, а на юге – сбросный канал. Древесный ярус кв.124 представлен *Pinus sylvestris* высотой до 10-12 м. Характерно наличие густого соснового подроста. Кустарничковый ярус развит хорошо, высота составляет в среднем 40-60 см, состоит главным образом из багульника (*Ledum palustre*), болотного мирта (*Chamaedaphne calyculata*) и голубики (*Vaccinium uliginosum*). Моховой ярус с проективным покрытием 70-90 %. В положительных элементах микрорельефа преобладает *Sphagnum magellanicum*, вместе с ними произрастают сфагнум волосолистный (*Sph. Capillifolium* (Ehrh.) Hedw.), Руссова (*Sphagnum russowii* Warnst.), В отрицательных элементах – сфагнум обманчивый (*Sph. fallax* (Klinggr.)). Среднее значение проективного покрытия клюквы составило 20,4 %, а максимальное – 72 %. Средняя урожайность клюквы составила 33,5 кг/га.

Участок № 2 – участок 71 кв. Куплангского лесничества. Площадь участка 82,9 га. Осушительные каналы располагаются с запада на восток, их количество равно 4. Накопительный канал расположен на западе участка, сбросный канал – на востоке. Древесный ярус, как и в кв.124, в основном представлен *Pinus sylvestris*, единично *Betula pendula*. Кустарнички представлены *Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata*, *Vaccinium uliginosum*, *Andromeda polifolia*, *Охусoccus palustris*. Проективное покрытие мохового яруса 75-90 %, представленного в основном *Sphagnum magellanicum*. Озеро Изъяр карстового происхождения поддерживает стабильный уровень грунтовых вод. На территории участка было заложено 408 учетных точек. Полнота древостоя на участке в среднем составила 0,4-0,8. Среднее значение площади проективного покрытия клюквы составило 18,3 %, максимальное значение – 90 %. Средняя урожайность составила 37,5 кг/га.

При обследовании мелиоративных каналов на объекте исследования отмечено, что они находились для обоих участков в неудовлетворительном состоянии.

Результаты исследований и их обсуждение

Влияние осушения на состояние древостоя

Результаты исследования состояния древостоя на пробных площадях приведены в таблице 2.

Таблица 2

Таксационная характеристика пробных площадей

№ пп.	Расположение от канала	Состав	Возраст, лет	H ср, м	D, см	Полнота	Кол-во дер/га	Запас на га, м ³	
								растущий	наличный отпад/га
I. Сосняк сфагновый кв.71									
1	10 м от озера 45-55 от канала	10С	50	0,97	2,2	0,33	4050	3,78	0,391
2	35-45 м от канала и озера	10С	50	1,05	2,1	0,63	5850	3,88	3,64
3	3-13 м от канала, 60-70 м от озера	6С	50	0,94	2,3		6300	13,79	4,07
		4Б	15	1,57	2,5		4450	7,92	0,1
		Итого				1,38	10750	21,61	4,17
II. Сосняк кустарничково-сфагновый кв.71									
4	3-13 м от канала	9С	50	1,62	3,1		12100	26,73	0,2
		1Б	15	2,31	2,4		13700	4,25	0
		Итого				1,54	25800	30,98	0,02
5	35-45 м от канала	10С	50	1,77	3,9	0,87	7050	29,2	8,74
6	125-135 м от канала	10С	50	2,64	5,5	0,92	4500	39,3	12,3
III. Сосняк кустарничково-сфагновый кв.124									
7	5-15 м от канала	10С	20	4,49	4,9	1,57	21500	48,27	1,62
8	35-45 м от канала	10С	50	4,39	10,1	0,68	1970	52,39	13,96
9	125-135 м от канала	10С	50	3,99	9,9	0,61	1950	48,7	27,46

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы: влияние осушения на формирование запаса древостоя наиболее существенно вблизи канала, так как при рубке трассы под канал старая часть древостоя была уничтожена, а новое поколение древостоя вдоль каналов совпадает с возрастом прокладки осушительной системы и по запасу достигло старовозрастных деревьев в межканальном пространстве.

Вблизи канала древостой более жизнеспособный, так как наличного отпада меньше в 10 раз, чем в межканальном пространстве. В середине межканального пространства древостой представлен в старом возрасте, он расстроен большим отпадом, из-за ажурности крон и ослабленности деревьев создаются оптимальные условия для развития клюквы.

Влияние запаса неопределенно ввиду того, что среди клюквенных болот встречаются древостои разных возрастов. Крупные старовозрастные древостои создают запас, а при низкой полноте расстояние между деревьями большое и на урожайность этот запас не влияет.

Сосняки на клюквенных болотах, имея полноту 0,3-0,4, по санитарной характеристике относятся к находящимся в стадии разрушения из-за значительного патологического отпада, который превышает нормальный уровень естественного изреживания леса в 5-12 раз. При приросте оголения лесопокрытой площади 500 м²/га полного выпадения древостоя не происходит из-за дополняющих древесный полог молодых поколений сосны. Возрастная структура сосняков колеблется 6-7 поколениями от 20 до 150 лет.

Влияние сомкнутости полога древостоя на площадь проективного покрытия и урожайность клюквенников

Создание благоприятного для роста древостоя режима влажности почвы отрицательно влияет на урожайность клюквы. По мере удаленности от каналов наблюдается снижение полноты древостоя (табл. 3).

Таблица 3

Сомкнутость полога древостоя / проективное покрытие клюквы (%) на участках (средние показатели)

Участок	Расстояние от канала, м					
	вблизи канала	10-25	35-45	65-75	160	В целом по участку
№ 1	$\frac{0,8}{0}$	$\frac{0,7-0,6}{14}$	$\frac{0,5}{32}$	$\frac{0,4-0,5}{36}$	$\frac{0,5}{19}$	$\frac{0,5}{20,4}$
№ 2	$\frac{0,8-0,9}{0}$	$\frac{0,7}{18}$	$\frac{0,6}{38}$	$\frac{0,5-0,6}{30}$	$\frac{0,5}{6}$	$\frac{0,6}{18,3}$

Влияние сомкнутости полога древостоя на проективное покрытие клюквы на участке 1 (кв. 124) следующее: непосредственно вблизи каналов сомкнутость полога древостоя составляет 0,8 и этому показателю соответствует наименьшая степень проективного покрытия; наибольшая степень проективного покрытия (0,6-0,8) наблюдается при сомкнутости древостоя 0,3-0,4. Установлена корреляционная связь: коэффициент корреляции – 0,7 (обратная тесная связь сомкнутости полога древостоя и площади проективного покрытия клюквы). Влияние полноты древостоя на проективное покрытие клюквы на участке 2 (кв.71): вблизи каналов сомкнутость полога древостоя составляет 0,9 и этой полноте также соответствует наименьшая степень проективного покрытия; наибольшая степень проективного покрытия наблюдается при сомкнутости полога древостоя 0,4-0,5, коэффициент корреляции – 0,4 (обратная умеренная связь). Такое различие между участками обусловлено наличием в кв. 71 озера Изъяр, непосредственное влияние которого сказывается на прилегающих к озеру фитоценозах.

При рассмотрении влияния осушительных каналов на проективное покрытие клюквы наблюдается, что вблизи каналов проективное покрытие наименьшее и в большинстве случаев равно 0; при удалении от канала степень проективного покрытия клюквы увеличивается.

По результатам многолетних наблюдений нами были получены следующие данные показателя урожая клюквы в зависимости от сомкнутости древесного полога (табл. 4) как на мелиорируемых участках, так и на естественных.

Таблица 4

Урожай клюквы в зависимости от сомкнутости крон древесного полога (кг/га)

Тип болота	Сомкнутость полога			
	0,3	0,4-0,5	0,7	0,9
Олиготрофный (мелиорируемые участки)	49	60	28	0
Олиготрофный (естественное состояние)	64	80	21	5
Мезотрофный (естественное состояние)	78	97	55	0

Влияние удаленности от канала на урожайность клюквы

При оценке урожайности клюквы болотной также учитывалось влияние удаленности от канала. Полученные результаты сведены в таблицу 5.

Таблица 5

Урожайность клюквы в 2018 году на исследуемых участках, кг/га

Показатель	Участок	Канал	Расстояние от канала, м					Контроль
			0	10-25	35-45	65-75	160	
Урожайность ягод, кг/га	№ 1 (кв.124)	Осушительный	0	2,8±0,2	68,6±11,4	93,0±12,2	96,3±12,4	255,4±22,7
		Собирательный	0	3,6±0,3	80,4±10,5	97,1±11,9	83,9±10,2	
		В целом по участку	0	3,8±0,2	84,5±10,9	95,0±12,0	90,1±11,3	
Урожайность ягод, кг/га	№ 2 (кв.71)	Осушительный	0	1,5±0,6	30,7±2,9	112,2±7,7	58,1±13,6	196,0±18,6
		Собирательный	0	0	33,3±3,2	81,9±8,5	64,9±4,2	
		В целом по участку	0	0,7±0,3	32,0±3,0	97,0±8,1	61,5±8,9	

Вблизи канала урожайность на обоих участках равна нулю. На участке № 1 на расстоянии 10-25 м урожайность составила 3,1±0,2 кг/га. При увеличении расстояния до 35-45 м урожайность возросла в 22 раза; до 65-75 м – в 25 раз; до 160 м – в 23 раза. Оптимальным является расстояние 65-75 м от канала, что в большинстве случаев приходится на середину межканального пространства, где наблюдается высокая степень проективного покрытия и урожайность клюквы. Однако в данном случае урожайность клюквы оказывается в 2-2,5 раза ниже, чем на контрольных участках.

На участке № 2 наблюдаются подобные же зависимости. На расстоянии 10-25 м урожайность составила 1,5±0,6 кг/га. При увеличении расстояния до 35-45 м урожайность возросла в 43 раза; до 65-75 м – в 129 раз, до 160 м – в 82 раза. Так же как и на первом участке, мы можем сказать, что наиболее оптимальным по этому показателю является расстояние 65-75 м. Исходя из полученных результатов, можно считать, что при увеличении расстояния от канала урожайность клюквы возрастает, и оптимальным расстоянием можно с достоверностью назвать 65-75 м.

Осушительные и собирательные каналы оказывают разное влияние на урожайность клюквы. На участке № 1 урожайность больше при действии собирательных каналов, и по сравнению с осушительными каналами больше в 1,1-1,5 раза. А на участке № 2 существенного отличия показателей урожайности от осушительного и собирательного каналов не выявлено. Здесь следует учитывать состояние каналов. Их очистка не проводилась с 1986 года.

Осушительные каналы практически на всей протяженности заросшие и частично захламы, в последнее время не выполняют своих функций. Собирательные каналы шире и глуб-

же, чем осушительные, в настоящее время еще действуют. Однако следует предположить, что этот показатель может существенно меняться в зависимости от количества выпадающих осадков в течение вегетационного периода, а также от уровня грунтовых вод в течение сезона на всей площади торфяного болота.

Заключение. Мелиоративная система, созданная для выращивания высоких урожаев клюквы, не выполняет свою первоначальную функцию. Опыт ведения лесного хозяйства на мелиорированных землях, в том числе и в Республике Марий Эл (Корепанов, Дружинин, 1994; Кусакин, 1999), показывает, что достигнуть высокого лесоводственного эффекта (выращивание древостоя) на олиготрофном (верховом) болоте невозможно. Он достигается только на евтрофных (низинных) и значительно ниже на мезотрофных (переходных) болотах.

Исследования, проведенные на осушенной территории, показали:

- плантация, созданная для выращивания высоких урожаев клюквы, не выполняет свою первоначальную функцию;
- мелиоративная система без проведения ремонтных работ разрушается, и каналы относятся по степени повреждения от слабоповрежденных до средневредных;
- урожайность клюквы уменьшается пропорционально увеличению сомкнутости полога древостоя. Наибольшая сомкнутость у канала и составляет 0,8, этому показателю соответствует наименьшая степень проективного покрытия клюквы; наибольшая степень проективного покрытия клюквы наблюдается при сомкнутости древостоя 0,3;
- непосредственно вблизи каналов сомкнутость полога древостоя составляет 0,8, и этому показателю соответствует наименьшая степень проективного покрытия; наибольшая степень проективного покрытия наблюдается при сомкнутости древостоя 0,3 и, естественно, на открытых полянах;
- по истечении 15-25-летнего периода процесс уменьшения клюквы с проективным покрытием 30-50 % возрастает и в дальнейшем можно прогнозировать, что через 20-30 лет такое проективное покрытие клюквы на данной территории составит менее 10 %, а общая площадь, занятая клюквенниками, уменьшится на 30 % и составит около 20 % от общей площади участков.

Библиографический список

1. Боч, М.С. Некоторые итоги и перспективы охраны и рационального использования болот в СССР / М.С. Боч, В.В. Мазинг // Антропогенные изменения, охрана растительности болот и прилегающих территорий. – Минск: Наука и техника, 1981. – С.12-19.
2. Вомперский, С.Э. Проблемы использования болот в лесном хозяйстве / С.Э. Вомперский // Ресурсы болот СССР и пути их использования. – Хабаровск: ДВО АН СССР, 1989. – С.17-29.
3. Демаков, Ю.П. Продуктивность и морфоструктура древостоя в субклимаксовых сосняках сфагновых / Ю.П. Демаков, М.Г. Сафин, С.А. Бирюкова, А.А. Хренова // Проблемы экологии и природопользования в бассейнах рек Республики Марий Эл и сопредельных регионов. – Йошкар-Ола: ПИК Принт-Ф, 2006. – С.44-47.
4. Ефимова, Т.Н. Охраняемые болотные экосистемы Республики Марий Эл // Т.Н. Ефимова, М.А. Сытина, Т.Е. Шведова, А.В. Кусакин. Материалы конференции «IX Галкинские чтения» (Санкт-Петербург, 5 – 7 февраля 2018 г.) / под ред. д.б.н. Т.К. Юрковской), Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. – С.117-121.
5. Корепанов, А.А. Влияние осушения на экологию и произрастание леса / А.А. Корепанов, Н.А. Дружинин. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1994. – 208 с.
6. Кусакин, А.В. Рациональное использование и охрана торфоболот в Республике Марий Эл / А.В. Кусакин // Устойчивое развитие: экология и управление природопользованием. – Москва: Изд-во РАГС, 1999. – С.125-136.
7. Кусакин, А.В. Болота Марий Эл: охрана и рациональное использование: монография / А.В. Кусакин. – Йошкар-Ола, 2000. – 200с. – Депон. в ВИНТИ 10.03.2000, № 612-ВОО.
8. Пьявченко, Н.И. Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение / Н.И. Пьявченко. – Москва: Наука, 1985.

9. Шабалова, В.И. Характеристика почвенно-гидрологических условий в связи с окультуриванием клюквенников в Волжском лесокombинате / В.И. Шабалова, Р.В. Сорфина // Проблемы использования, воспроизводства и охраны лесных ресурсов: материалы респ. науч.-практ. конф. – Йошкар-Ола: Марийск. кн. изд-во. – 1989. – С.43.
10. Adamus, H.R. A method for wetland functional assessment / H.R. Adamus, L.T. Stockwell. – Washington: Springfield. 1983.
11. Cranberry Grower's Planning Handbook / Conducted By: Bill Zweigbaum // Cape Cod Cranberry Growers Association Massachusetts Department of Food & Agriculture, 2000. – 20 p.
12. Gervais, A. Assessing Wild Bee Biodiversity in Cranberry Agroenvironments: Influence of Natural Habitats / A. Gervais, V. Fournier, C.S. Sheffield, M. Chagnon // Journal of Economic Entomology. – 2017. – Vol. 110, No. 4. – P. 1424-1432.
13. Naumov, A.V. Modern gas-exchange processes in forest-steppe sphagnum bogs in the Baraba (West Siberia) / A.V. Naumov // Contemporary Problems of Ecology. – 2011. – Vol. 4. Article number: 487.
14. Michalecka, M. Identification and characterization of *Diaporthe vaccinii* Shear causing upright dieback and viscid rot of cranberry in Poland / M. Michalecka, H. Bryk, P. Seliga / European Journal of Plant Pathology. – 2017. – Vol. 148. – P. 595-605.
15. Zampella, R.A. Macroinvertebrate assemblages in blackwater streams draining forest land and active and abandoned cranberry bogs / R.A. Zampella, J.F. Bunnell, N.A. Procopio, D.E. Bryson // Wetlands. – 2008. – Vol. 28. – P. 390-400.

References

1. Boch M.S., Mazing V.V. Nekotorye itogi i perspektivy okhrany i ratsional'nogo ispol'zovaniya bolot v SSSR [Some results and prospects for the protection and rational use of swamps in the USSR], *Antropogennye izmeneniya, okhrana rastitel'nosti bolot i prilegayushchikh territorii* [Anthropogenic changes, protection of vegetation of swamps and adjacent territories], Minsk: Nauka i tekhnika, 1981, pp.12-19.
2. Vomperskii S.E. Problemy ispol'zovaniya bolot v lesnom khozyaistve [Problems of using swamps in forestry], *Resursy bolot SSSR i puti ikh ispol'zovaniya* [Resources of the swamps of the USSR and ways to use them], Khabarovsk: DVO AN SSSR, 1989, pp.17-29.
3. Demakov Yu.P., Safin M.G., Biryukova S.A., Khrenova A.A. Produktivnost' i morfostruktura drevostoy v subklimaksovykh sosnyakakh sfagnovykh [Productivity and morphostructure of stand in subclimax sphagnum pine forests], *Problemy ekologii i prirodopol'zovaniya v basseynakh rek Respubliki Marii El i sopredel'nykh regionov* [Problems of ecology and nature management in the river basins of the Republic of Mari El and adjacent regions], Ioshkar-Ola: PIK Print-F, 2006, pp.44-47.
4. Efimova T.N., Sytina M.A., Shvedova T.E., Kusakin A.V. Okhranyaemye bolotnye ekosistemy Respubliki Marii El [Protected wetland ecosystems of the Mari El Republic], *Materialy konferentsii «IX Galkinskije Chteniya»* [Materials of the conference “IX Galkin Readings”], Sankt-Peterburg, Izdatel'stvo SPbGETU «LETI», 2018, pp.117-121.
5. Korepanov A.A., Druzhinin N.A. Vliyanie osusheniya na ekologiyu i proizrastanie lesa [The impact of drainage on the ecology and forest growth], Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyar. un-ta, 1994, 208 p.
6. Kusakin A.V. Ratsional'noe ispol'zovanie i okhrana torfobolot v Respublike Marii El [Rational use and protection of peat bogs in the Republic of Mari El], *Ustoichivoe razvitie: ekologiya i upravlenie prirodopol'zovaniem* [Sustainable Development: Ecology and Environmental Management], Moskva: Izd-vo RAGS, 1999, pp.125-136.
7. Kusakin A.V. Bolota Marii El: okhrana i ratsional'noe ispol'zovanie [Marshes of Mari El: protection and rational use]: monografiya, Ioshkar-Ola, 2000, 200 p.
8. P'yavchenko N.I. Torfyanye bolota, ikh prirodnoe i khozyaistvennoe znachenie [Peat bogs, their natural and economic importance], Moskva: Nauka, 1985.
9. Shabalova V.I., Sorfina R.V. Kharakteristika pochvenno-gidrologicheskikh uslovii v svyazi s okul'turivaniem klyukvennikov v Volzhskom lesokombinate [Characterization of soil-hydrological conditions in connection with the cultivation of cranberries in the Volga Forest Plant], *Problemy ispol'zovaniya, vosproizvodstva i okhrany lesnykh resursov* [Problems of the use, reproduction and protection of forest resources]. *Materialy Resp. nauch.-prakt. Konf.* Ioshkar-Ola: Mariisk. kn. izd-vo, 1989, pp.43.
10. Adamus H.R., Stockwell L.T. A method for wetland functional assessment, Washington: Springfield, 1983.
11. Cranberry Grower's Planning Handbook, Conducted By: Bill Zweigbaum, Cape Cod Cranberry Growers Association Massachusetts Department of Food & Agriculture, 2000, 20 p.
12. Gervais A., Fournier V., Sheffield C.S., Chagnon M. Assessing Wild Bee Biodiversity in Cranberry Agroenvironments: Influence of Natural Habitats, *Journal of Economic Entomology*, 2017, Vol. 110, No. 4, pp. 1424-1432.
13. Naumov A.V. Modern gas-exchange processes in forest-steppe sphagnum bogs in the Baraba (West Siberia), *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, Article number: 487.
14. Michalecka M., Bryk H., Seliga P. Identification and characterization of *Diaporthe vaccinii* Shear causing upright dieback and viscid rot of cranberry in Poland, *European Journal of Plant Pathology*, 2017, Vol. 148, pp. 595-605.
15. Zampella R.A., Bunnell J.F., Procopio N.A., Bryson D.E. Macroinvertebrate assemblages in blackwater streams draining forest land and active and abandoned cranberry bogs, *Wetlands*, 2008, Vol. 28, pp. 390-400.

ПРИЖИВАЕМОСТЬ И РОСТ ОПЫТНЫХ КУЛЬТУР ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО (QUERCUS ROBUR L.), СОЗДАНЫХ СЕЯНЦАМИ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ, ВЫРАЩЕННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ ПИТАТЕЛЬНЫХ СУБСТРАТАХ

К. В. Рыбаков, В. Г. Краснов, М. И. Смышляева
Поволжский государственный технологический университет

В статье представлен опыт создания опытных культур дуба черешчатого с использованием сеянцев с закрытой корневой системой (ЗКС), выращенных на различных питательных субстратах на территории питомника лесных и декоративных древесных растений «Азяково» Ботанического сада-института Поволжского государственного технологического университета. Цель исследования – выявить оптимальный вид субстрата при выращивании сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой для последующего эффективного создания лесных культур, соответствующего по экономическим и качественным требованиям производимых сеянцев данной породы в условиях зоны хвойно-широколиственных лесов Среднего Поволжья. Приведены характеристики: агрохимических свойств субстратов, грунтовой всхожести желудей дуба черешчатого, устойчивости корнезакрывающего кома субстрата, массы сухого вещества основных фракций сеянцев дуба, а также биометрические показатели сеянцев в зависимости от используемого при выращивании вида субстрата. Исследование включало проведение инвентаризации опытных объектов, которую проводили в октябре 2016 и 2017 гг., полученные данные были обработаны с использованием методов математической статистики. В результате определено, что по показателям приживаемости данные достоверно отличаются по вариантам опыта $F_{расч.} > F_{табл.}$ ($7,14 > 2,51$), доля влияния фактора 75,93 %. Была произведена оценка вариантов опыта по комплексу показателей имеющие влияние на рост дуба в теплице и в лесных культурах. Определены оптимальные варианты субстрата – № 3 и 8. Выявлена зависимость приживаемости растений и плотности сложения субстрата в вариантах опыта. Оптимальная плотность сложения находится в пределах от 0,4-0,6 г/см³. Также выявлена зависимость кислотности почвенного раствора субстрата и приживаемости растений в лесных культурах. Оптимальный уровень кислотности используемых субстратов от 5,0-6,5.

Ключевые слова: дуб черешчатый, субстрат, лесные культуры, сеянцы с закрытой корневой системой, приживаемость, плотность сложения.

SURVIVAL ABILITY AND GROWTH OF EXPERIMENTAL ENGLISH OAK (QUERCUS ROBUR L.) COMPOSED OF SEEDLINGS WITH CLOSED ROOT SYSTEM GROWN IN DIFFERENT NUTRITIOUS SUBSTRATES

K.V. Rybakov, V.G. Krasnov, M.I. Smyshlyeva
Volga State University of Technology

This paper presents the approach to establishing experimental plantations of English oak from seedlings with a closed root system grown on various nutrient substrates on the territory of the nursery of forest and decorative woody plants "Azyakovo" of Volgatch Botanical Garden-Institute. The research aims to identify the optimal type of substrate for growing the seedlings of English oak with a closed root system for the effective establishment of forest plantations that meet economic and quality requirements to these types of seedlings on the territory of coniferous-broad-leaved forests of the Middle Volga Region. The paper analyses agrochemical properties of substrates, germination of acorns, stability of root-closing balls, dry weight of the main fractions of oak seedlings, and their biometric indicators depending on the type of substrate used. The research involved the inventory of experimental objects, which was carried out in October 2016 and 2017. The data obtained were processed using mathematical statistics methods. The research revealed that the data differ significantly in terms of survival rates for F calculated value $> F$ table value ($7.14 > 2.51$), the influence of the factor is 75.93%. A set of indicators that impact the growth of oak in green-

houses and on forest plantations have been assessed. The optimal substrate compositions have been determined - No. 3 and No. 8. The dependence of plant survival rate on the density of substrate composition in the variants under study have been determined. The optimal substrate composition density varies in the range between 0.4 g/cm³ and 0.6 g/cm³. The correlation between the substrate acidity and seedling survival rate on forest plantations has also been revealed. The optimal acidity level of the substrates used varies from 5.0 to 6.5.

Keywords: English oak, substrate, forest plantations, seedlings with a closed root system, survival rate, substrate composition density.

Введение

В связи с глобальным потеплением и изменением климата на нашей планете актуальной задачей является сохранение и увеличение площадей лесов, выявления закономерностей роста и особенностей основных древесных пород (Курбанов, 2010). В условиях изменения климата меняются устойчивость и продуктивность многих лесных экосистем (Hanewinkel et al., 2013; Курбанов, 2014).

В результате воздействия комплекса неблагоприятных факторов сильно пострадали насаждения дуба черешчатого в Среднем Поволжье. Дуб черешчатый, или обыкновенный (*Quercus robur* L.) является одной из наиболее долговечных и хозяйственно ценных древесных пород (Лосицкий, 1981; Усольцев, 2014). В соответствующей среде обитания он образует смешанные по составу и сложные по структуре высокопродуктивные насаждения, которые выполняют многие экологические функции (Яковлев, 1999; Краснов и др., 2007; Bobiec et al., 2018). Дуб черешчатый – важнейшая лесообразующая порода. Он может расти в самых разных почвенных условиях, но предпочитает богатые, близкие к нейтральным, не кислые почвы (Пчелин, 2007).

Немаловажную роль при этом играет создание лесных культур. Искусственное лесовосстановление – это комплекс мероприятий, направленных в конечном итоге на создание устойчивых и высокопродуктивных лесных насаждений, обеспечивающих сохранение всех полезных функций лесов. Все этапы лесовосстановления важны, но первостепенное, особое место среди них занимает использование высококачественного стандартного посадочного материала (Приказ ..., 2016).

В настоящее время просматривается тенденция все большего использования технологии выращивания семян и саженцев с закрытой корневой системой (ЗКС). Данный способ имеет широкое распространение в странах Европы, в США, а в последнее время и в России (Kohmann, Börja, 2002; McRae 2005; Tsakalimi et al., 2005; Ширнин, 2017). Главным образом проработан вопрос производства семян с ЗКС для хвойных пород. В то же время выращивание лиственных пород, в том числе и дуба черешчатого, для целей лесовосстановления в России исследовано недостаточно глубоко.

Перспективная технология восстановления дубовых лесов – это создание культур сеянцами и саженцами с закрытой корневой системой (Rantala et al., 2003; Chirino et al., 2008; Смышляева, 2015). Данная технология предоставляет возможность использовать ценный по наследственным свойствам посадочный материал, причем расход посевного материала уменьшается, увеличивается возможный период проведения работ по посадке леса и приживаемость древесных растений на лесокультурной площади (Salifu et al., 2009; Gil-Pelegri et al., 2017).

Проблема дороговизны семян с ЗКС в настоящее время является актуальной. Наряду с большим преимуществом семян с ЗКС, отмечается также их высокая цена по сравнению с обычными сеянцами с открытой корневой системой. Большой процент себестоимости сеян-

цев с ЗКС составляет стоимость субстрата (Бартенев, 2013; Романов и др., 2017; Ширнин, 2017; Рыбаков и др., 2018).

Цель исследования – выявить оптимальный вид субстрата при выращивании сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой для последующего эффективного создания лесных культур, соответствующего по экономическим и качественным требованиям производимых сеянцев данной породы в условиях зоны хвойно-широколиственных лесов Среднего Поволжья.

Решаемые задачи: выявить приживаемость и рост опытных культур дуба черешчатого, созданных сеянцами с ЗКС с использованием разных видов субстратов в Республике Марий Эл (РМЭ).

Объект исследования – опытные культуры дуба черешчатого, созданные сеянцами с закрытой корневой системой на территории питомника лесных и декоративных древесных растений «Азяково» Ботанического сада-института ФГБОУ ВО «ПГТУ».

Для изучения влияния питательного субстрата на рост сеянцев дуба использовали контейнеры НИКО V-150 SideSlit, объём ячейки составляет 150 см³. Кассеты вручную заполнялись следующими субстратами:

1) компост из опилок и осадков сточных вод, приготовленный в ПГТУ на полигоне п. Нолька («Нолька») (НЗ);

2) переходный торф Параньгинского торфопредприятия РМЭ, заготовленный в 2015 году (П15);

3) субстрат, изготовленный в Ботаническом саду-институте ПГТУ, состоящий из песка, торфа и биогумуса (БС);

4) переходный торф из Параньгинского торфопредприятия РМЭ, заготовленный в 2010 году, отработанный при выращивании посадочного материала хвойных пород в закрытом грунте в течение 3-х лет (Пв10);

5) субстрат на основе компоста из подстилочного навоза крупного рогатого скота, приготовленный по рекомендации учёных ПГТУ на территории полигона с. Азяково РМЭ («Азяково») (АЗ);

6) верховой торф из Псковской области поставки 2013 года «Велторф 2013» (Вт13);

7) верховой торф из Псковской области поставки 2014 года «Велторф 2014» (Вт14);

8) переходный торф Параньгинского торфопредприятия РМЭ, заготовленный в 2010 году и хранившийся без укрытия в течение 3 лет (Пн10);

9) субстрат на основе лесной почвы (А₁ – гумусовый горизонт) из дубравных насаждений (ЛЗ).

Материалы и методика исследований. Жёлуди, предназначенные для посева, были собраны в насаждениях дуба черешчатого в Ботаническом саду-институте ПГТУ осенью 2014 года. Их сортировка проводилась методом флотации, обработка перед посевом – фундазол (4 г на 1 кг желудей). Сеянцы выращивались на базе Ботанического сада-института «ПГТУ» в теплице арочного типа с поликарбонатным покрытием и наличием автоматизированной поливной системы. Посев производился вручную в апреле 2015 года одновременно в контейнеры всех вариантов субстрата. Уход за сеянцами заключался в прополке, а также в обработке от грибных болезней: фундазол – двукратно, байлетон – двукратно; и от листогрызущих вредителей – фитоверм двукратно. Подкормка сеянцев минеральными удобрениями не проводилась. Всхожесть определялась на 30-й день после посева как отношение количества всходов к количеству высеянных желудей, выраженное в процентах. Всхожесть желудей колеблется в пределах от 58,3 до 87,5 %. Минимальный показатель всхожести был отмечен в варианте 9 в субстрате на основе лесной почвы, а максимальный – в субстрате на основе компоста из подстилочного навоза крупного рогатого скота (5). Средняя всхожесть на всех видах субстрата составила 72,04 %.

Замеры высот, биомасс и объёмов сеянцев проводились в сентябре – октябре 2015 года. Определение биометрических показателей каждого растения проводилось при помощи измерительных инструментов: высоты стволика – линейкой с миллиметровыми делениями; диаметра корневой шейки – штангенциркулем (с точностью до 0,1 мм); массы сухого вещества – электронными весами (с точностью 0,001 г).

Осенью 2015 года на участке была проведена сплошная обработка почвы плугом общего назначения. Лесные культуры были заложены весной 2016 года сеянцами с закрытой корневой системой под лопату. Перед посадкой была произведена сортировка сеянцев – выделялись стандартные сеянцы дуба черешчатого по «Правилам лесовосстановления» по высоте стволика не менее 12 см и диаметру корневой шейки не менее 3 мм. Исследуемые варианты располагались на участке равномерно в трёх повторностях, что позволило исключить влияние других факторов.

На лесокультурном участке в каждой повторности варианта опыта сеянцы располагались в площадках 5 × 10 м; расстояние между рядами 1,5 м; в ряду – 0,75 м. В каждой повторности высажено 39 растений. В течение 2016 и 2017 гг. на участке проводились агротехнические уходы. В 2017 году проведен однократный химический уход для борьбы с мучнистой росой.

Определение показателей каждого растения проводилось при помощи измерительных инструментов: высота стволика – линейки; диаметр корневой шейки – штангенциркуля (точность до 0,1 мм).

Обработку полевых данных проводили методом математической статистики с помощью прикладных программ Statistika 6 и Excel 2010.

Результаты исследования и их обсуждение. Устойчивость корнезакрывающего кома субстрата очень важна при выращивании сеянцев с закрытой корневой системой. Этот показатель имеет значение при подборе подходящего вида субстрата: если ком не сохраняется при извлечении сеянца из контейнера, нарушается технология создания лесных культур сеянцами с ЗКС. Полученные данные по устойчивости корнезакрывающего кома субстрата представлены на рисунке 1.



Рис. 1. Балл устойчивости корнезакрывающего кома субстрата

Для определения сохранности кома корнезакрывающего субстрата при извлечении сеянцев из ячейки нами была принята «условная шкала устойчивости» (от 1 до 5): 1 – распадается 100 % объёма кома; 2 – распадается до 80 % объёма кома; 3 – распадается до 60 % объёма кома; 4 – распадается до 30 % объёма кома; 5 – сохранилось 100 % объёма кома. Во всех вариантах опыта данный показатель варьирует от 4,1 до 4,9 балла (при максимальном значении в 5,0 баллов), что указывает на высокую сохранность кома субстрата при извлечении сеянца из контейнера.

При проведении эксперимента была использована методика закладки полевого опыта по Б. А. Доспехову (1979). На территории питомника преобладает дерново-слабоподзолистая легкосуглинистая почва на покровных суглинках. По химическим показателям почвы питомника можно сделать вывод о низком содержании гумуса, нейтральной реакции среды, достаточной насыщенности подвижными формами фосфора и обменного калия.

Содержание органического вещества в субстратах определялось методом сухого озоления (ГОСТ 26714-85 и ГОСТ 27980-88). Кислотность (рН солевой вытяжки) выявляли потенциометрическим методом (ГОСТ 27979-88). Подвижные формы калия и легкорастворимые соединения фосфатов в вытяжке определяли по методу А. Т. Кирсанова (ГОСТ 26207-91). Определение нитратного азота осуществляли дисульфифеноловым методом (ГОСТ 26951-86).

Наибольшим содержанием подвижных форм азота, фосфора и калия характеризуется субстрат № 6 – торф из Псковской области 2013 года поставки, это объясняется тем, что в этом году поставлялся торф с минеральными удобрениями. Наименьшая доля минеральных веществ, в частности P_2O_5 , K_2O , находится в субстрате № 8 – торф 2010 года заготовки из Параньгинского торфопредприятия, хранившийся без укрытия в течение трёх лет. Субстрат № 1 на основе компоста из опилок и осадков сточных вод, приготовленный в ПГТУ, является самым бедным по содержанию NO_3 . В исследуемых субстратах содержание P_2O_5 , K_2O и NO_3 имеет разное соотношение (рис. 2).

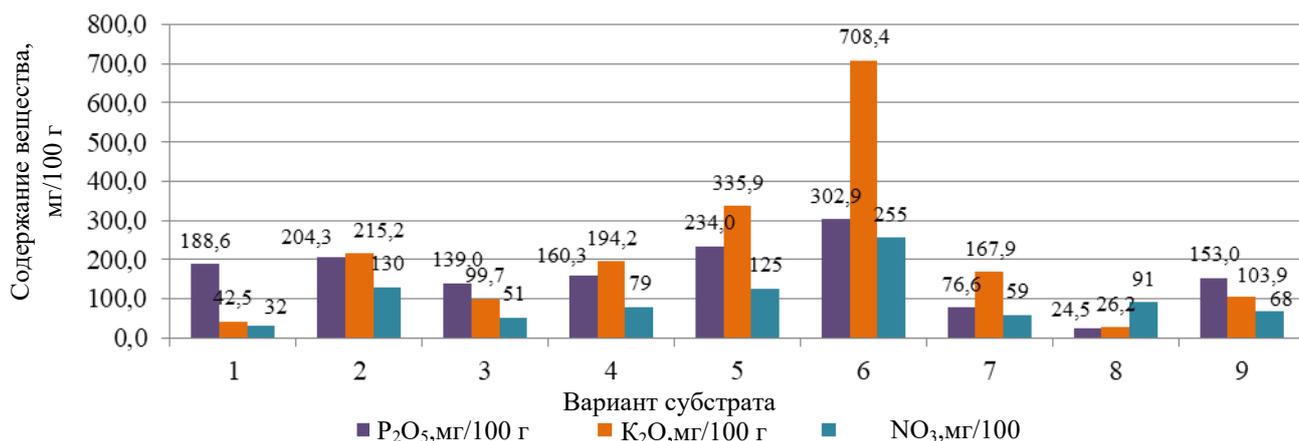


Рис. 2. Содержание P_2O_5 , K_2O и NO_3 в исследуемых субстратах

Содержание органического вещества в субстратах зависит от вида субстрата, в частности, в торфах содержание органического вещества максимально, а в субстратах, приготовленных разными способами, этот показатель явно ниже. Реакция почвенного раствора оказывает влияние на растения и микроорганизмы в почве. Уровень кислотности (рН солевой вытяжки) используемых субстратов по вариантам: 1) 4,25 – сильнокислая; 2) 5,35 – слабокислая; 3) 6,10 – нейтральная; 4) 4,88 – среднекислая; 5) 6,70 – нейтральная; 6) 6,11 – нейтральная; 7) 3,33 – сильнокислая; 8) 5,49 – слабокислая; 9) 7,13 – нейтральная. По литературным данным, дуб предпочитает почвы с близкой к нейтральной реакцией среды (рН = 5,5–7,5) (Пчелин, 2007). К субстратам с нейтральной реакцией среды относятся варианты: 3, 5, 6, 9.

Содержание минеральных веществ не является основным условием пригодности субстрата для выращивания древесных растений с ЗКС (Романов и др., 2009; Смышляева и др., 2016; Романов и др., 2017), так как при производстве субстрата можно путем внесения удобрения довести данный показатель до требуемого уровня. Большое влияние на рост сеянцев в контейнерах оказывают зольность и плотность сложения субстрата. Оптимальным для выращивания контейнерезированных сеянцев хвойных пород является верховой торф, так как он

имеет низкую плотность сложения и не уплотняется. Были определены данные показатели у исследуемых субстратов (табл. 1).

Таблица 1

Зольность и плотность сложения субстратов

№ варианта	Наименование	Зольность, %	Плотность сложения, г/см ³
1	НЗ	80,2	0,97
2	П15	44,0	0,57
3	БС	52,5	0,85
4	Пв10	28,2	0,43
5	АЗ	76,6	1,04
6	Вт13	27,7	0,46
7	Вт14	25,8	0,43
8	Пн10	25,1	0,53
9	ЛЗ	87,1	1,15

Наиболее близкие значения показателей субстрата, требуемые для выращивания посадочного материала с ЗКС (для хвойных пород), у торфов из Псковской области и местных – из Параньгинского торфопредприятия РМЭ. Результаты исследований показали, что при выращивании однолетних сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой нет необходимости закупки верхового торфа из других регионов. Использование субстратов на основе местных материалов позволит значительно уменьшить себестоимость сеянцев дуба черешчатого с ЗКС.

Сеянцы во всех вариантах по средним показателям высоты и диаметра корневой шейки достигли стандартных размеров. Достоверность различий по высоте надземной части сеянцев на 5 % уровне значимости не выявлена (Fрасч. < Fтабл.). Достоверность различий по диаметру корневой шейки сеянцев, также не выявлена (Fрасч. < Fтабл.). Длина корневых систем варьирует от 6,7 см (3) до 8,2 см (9). По данному параметру существенных различий по вариантам опыта не выявлено (Fрасч. < Fтабл.), длина корней также не зависит от вида субстрата, на ее показатели в большей степени влияют параметры кассет.

Таблица 2

Средние биометрические параметры и выход стандартных сеянцев дуба черешчатого по вариантам субстратов

№ варианта	Высота стволика, см	Диаметр корневой шейки, мм	Длина корневой системы, см	Выход стандартных сеянцев, %
1	13,27	6,74	7,01	68,00
2	14,16	5,83	7,00	70,67
3	13,78	6,60	6,73	70,67
4	13,90	6,19	7,07	76,00
5	13,89	6,88	7,45	72,00
6	12,98	6,38	7,51	73,33
7	13,62	7,08	7,83	70,67
8	13,91	6,49	8,16	74,67
9	13,38	6,75	8,18	64,00

По приведенным выше данным можно сделать вывод о том, что агрохимические свойства субстратов при выращивании однолетних сеянцев дуба черешчатого существенно не влияют на биометрические параметры сеянцев. Это объясняется тем, что жёлуди имеют большой запас питательных веществ, который сеянцы прежде всего используют в первый год выращивания в кассетах на образование органов и тканей.

Были изучены показатели длины и ширины листа, и по каждому варианту опыта определено среднее количество листьев на одном растении. Освещение и норма полива при выращивании сеянцев в условиях закрытого грунта для всех растений были одинаковыми, поэтому параметры листьев могли отличаться только по вариантам используемого субстрата. Бы-

ло доказано, что агрохимические свойства субстратов не влияют на количество и параметры листьев однолетних сеянцев дуба черешчатого.

С целью определения лучшего субстрата для выращивания сеянцев дуба черешчатого в контейнерах нами было изучено накопление биомассы растений по вариантам опыта. Масса абсолютно сухого вещества основных фракций сеянцев (в пересчете на 100 штук) представлена в таблице 2. При разделении сеянцев на фракции учитывали часть стволика, которая находится под землей, до корневой шейки (подземная часть стволика). По данному показателю существенность различий не доказана.

Абсолютно сухая масса надземной части сеянцев, в пересчете на 100 штук, находится в пределах от 53,4 г (6) до 63,0 г (5). Масса сухого вещества стволиков не зависит от вида субстрата (Fрасч. 1,09 < Fтабл. 5,14).

Выявлена зависимость абсолютно сухой массы листьев от используемого при выращивании сеянцев дуба черешчатого субстрата (Fрасч. 7,61 > Fтабл. 5,14). Максимальная масса листьев наблюдалась в вариантах: 1, 5, 9. Данные варианты субстратов имеют минимальное значение органического вещества, в сравнении с другими субстратами, основным компонентом которых является торф: 1 – 19,8; 5 – 23,4; 9 – 12,9 %. Ассимиляционный аппарат древесного растения обеспечивает все его органы энергией, превращенной им в процессе фотосинтеза в органическое вещество.

Наличие физиологически активных корней диаметром менее 3 мм необходимо для лучшей приживаемости растений после пересадки (Mucha et al., 2018). Максимальная масса мелких корней наблюдается в вариантах 4 – Пв10 (22,8 г) и 6 - Вт13 (20,2 г), а минимальные показатели массы наблюдались в варианте 2 – П15. Больше всего вид субстрата и его основные агрофизические показатели влияют на массу мелких физиологически активных корней (Fрасч. 6,09 > Fтабл. 5,14).

По массе крупных корней (диаметром более 3 мм) существенных различий между вариантами не выявлено (Fрасч. 2,06 < Fтабл. 5,14).

Отношение абсолютно сухой массы надземной части сеянца к подземной составляет 1:1 – 1:1,3. По исследованиям А. С. Яковлева (1999), для сеянцев дуба черешчатого с открытой корневой системой оптимальным считается соотношение 1:1,7.

Таблица 3

Абсолютно сухая масса основных фракций сеянцев по вариантам опыта

№ вар.	Масса надземной часть сеянца, г				Масса корневой системы, г			Отношение надземной части к подземной
	стволики	листья	подземная часть стволиков	итого	крупные корни (>3 мм)	мелкие корни (< 3 мм)	итого корни	
1	21,68	20,51	19,09	61,28	50,44	14,14	64,58	1:1,05
2	22,41	13,92	21,86	58,19	49,39	9,38	58,77	1:1,01
3	22,76	16,64	21,64	61,04	53,14	15,19	68,33	1:1,12
4	19,36	14,55	20,34	54,25	39,16	22,82	61,98	1:1,14
5	23,48	19,5	20,05	63,03	50,17	17,02	67,19	1:1,07
6	20,21	16,7	16,53	53,44	49,17	20,24	69,41	1:1,30
7	20,64	16,21	17,04	53,89	52,91	12,40	65,31	1:1,21
8	19,88	17,81	22,84	60,53	49,53	12,23	61,76	1:1,02
9	21,24	18,56	19,24	59,04	56,28	13,72	70,00	1:1,19
НСР05	9,276	6,157	8,692	-	22,722	11,771	-	-
Fрасч.	1,09	7,61*	2,88	-	2,06	6,09*	-	-
Fтабл.	5,14							

Примечание: * - различие на 5% уровне значимости доказано.

Инвентаризацию опытных объектов проводили в октябре 2016 и 2017 гг., результаты которой приведены в таблице 3, полученные данные обработаны с использованием методов математической статистики.

Таблица 4

Средние показатели опытных культур

№ варианта	Вариант опыта	Приживаемость, %		Средняя высота, см		Прирост высоты, см		Средний диаметр, мм		Мучнистая роса, %	
		2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017
1	НЗ	62,78	59,66	13,31	26,49	4,19	12,97	3,82	5,67	1,85	68,69
2	П15	90,60	80,34	14,97	23,11	3,35	11,86	3,32	5,96	8,55	80,52
3	БС	93,16	90,60	14,10	27,07	3,54	14,63	3,59	6,21	8,77	98,01
4	Пв10	82,05	73,50	11,66	22,67	2,62	13,92	3,27	5,92	0,00	85,89
5	АЗ	62,39	54,70	13,51	23,35	3,83	11,93	3,60	5,67	1,33	76,65
6	ВТ13	94,02	88,03	14,40	22,58	3,09	11,56	3,46	5,66	5,41	86,95
7	ВТ14	91,45	82,05	13,81	22,58	3,66	11,27	3,29	5,15	7,37	80,93
8	Пн10	98,29	93,16	12,52	26,70	3,35	15,27	3,71	6,37	6,97	86,14
9	ЛЗ	55,56	45,30	12,28	26,97	3,41	15,66	3,59	6,02	1,96	90,05

Наши исследования показали, что на первый год после посадки максимальная приживаемость наблюдается у растений в вариантах 8 (Пн10), 6 (ВТ13) и 3 (БС), а минимальная – в варианте с использованием субстрата на основе лесной почвы – 9. Это объясняется тем, что при извлечении и посадке сеянцев этого варианта происходило рассыпание кома субстрата.

По показателям приживаемости дисперсионный анализ показал, что данные достоверно отличаются по вариантам $F_{расч.} > F_{табл.}$ ($7,14 > 2,51$). Доля влияния данного фактора 76,03 %.

По высоте надземной части, прироста по высоте и по диаметру корневой шейки за 2016 год закономерность влияния на данные показатели не выявлена ($F_{расч.} < F_{табл.}$).

На второй год после посадки максимальная приживаемость наблюдается у растений в вариантах 8 – Пн10, 3 – БС и 6 – ВТ13, а минимальный показатель в варианте с использованием субстрата на основе лесной почвы – 9.

По показателям приживаемости дисперсионный анализ показал, что данные достоверно отличаются по вариантам опыта $F_{расч.} > F_{табл.}$ ($7,14 > 2,51$). Доля влияния данного фактора 75,93 %.

По высоте надземной части сеянцев максимальные показатели наблюдаются в вариантах 3 (БС), 8 (Пн10) и 9 (ЛЗ). Минимальный показатель высоты сеянцев наблюдается в вариантах 7 (ВТ14) и 6 (ВТ13). Существенность различий по данному показателю не выявлена ($F_{расч.} 0,96 < F_{табл.} 2,51$). Доля влияния фактора составляет всего 29,96 %.

По приросту сеянцев в высоту максимальные показатели наблюдаются в вариантах 9, 8 и 3, а минимальный – в варианте 1 (ВТ14).

По диаметру корневой шейки лучшими оказались сеянцы в вариантах 8, 3 и 9, наименьшими – 7 (ВТ14).

Влияние вида субстрата на диаметр корневой шейки и на прирост высоты саженцев не доказано ($F_{расч.} < F_{табл.}$).

При осенней инвентаризации на растениях дуба черешчатого были выявлены очаги мучнистой росы. Максимальная доля повреждений наблюдается в варианте 3 – 98,01% (БС), а минимальная в варианте 1 – 76,65% (НЗ). Закономерность поражения саженцев мучнистой росой от вариантов опыта не была выявлена ($F_{расч.} 0,88 < F_{табл.} 2,51$).

Выявлена зависимость приживаемости растений и плотности сложения субстрата в вариантах опыта. Оптимальная плотность сложения находится в пределах от 0,4-0,6 г/см³. В дан-

ном диапазоне значений находятся варианты: 4 – Пв10; 6 – Вт13; 7 – Вт14; 8 – Пн10. Такое сложение субстрата позволяет вырастить посадочный материал с оптимальными показателями для лучшей приживаемости на лесокультурном участке.

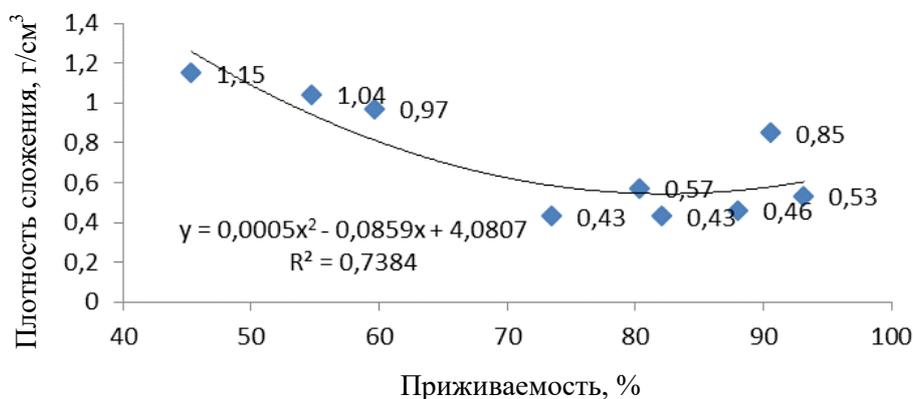


Рис. 3. Влияние плотности сложения субстрата на приживаемость растений в лесных культурах

Также выявлена зависимость кислотности почвенного раствора субстрата (рН солевой вытяжки) и приживаемости растений в лесных культурах. Оптимальный уровень кислотности используемых субстратов от 5 (слабокислая) – 6,5 (нейтральная) в вариантах: 2,3,4,6,8.

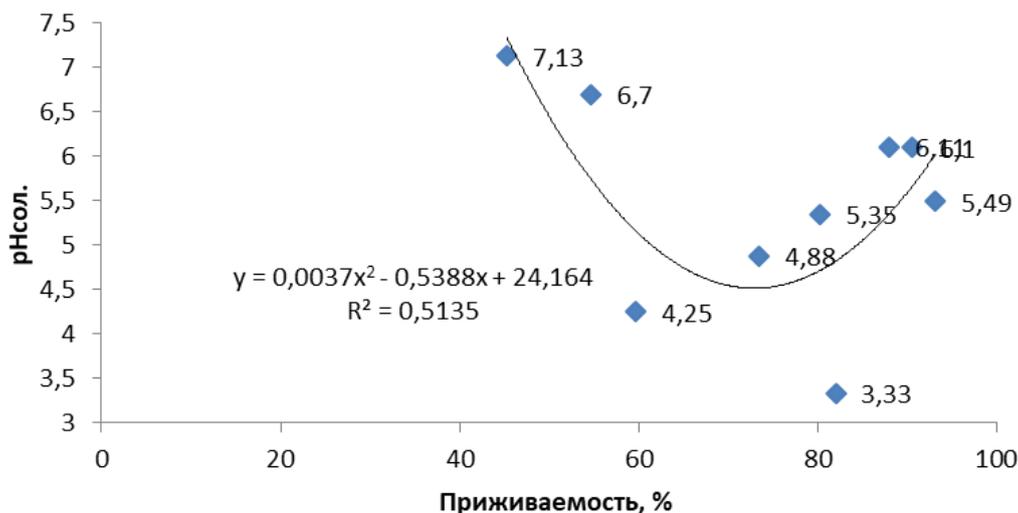


Рис. 4. Влияние кислотности почвенного раствора на приживаемость растений в лесных культурах

Используя ранговый метод (Лакин, 1990), мы произвели оценку вариантов опыта по комплексу показателей, имеющих влияние на рост дуба, в теплице и в лесных культурах. Оценивали такие показатели:

- средняя высота стволика сеянцев, выращенных в теплице;
- средний диаметр корневой шейки сеянцев, выращенных в теплице;
- устойчивость к разрушению корнезакрывающего кома субстрата;
- масса листьев от используемого при выращивании сеянцев субстрата;
- масса мелких физиологически активных корней сеянцев;
- средняя высота растений в опытных культурах;
- средний диаметр растений в опытных культурах;
- средний прирост растений в опытных культурах;
- приживаемость в лесных культурах на первый год роста;
- приживаемость в лесных культурах на второй год роста.

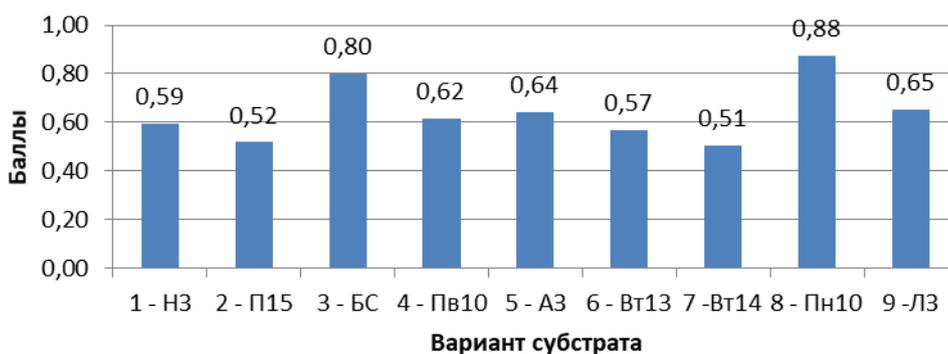


Рис. 5. Определение оптимальных вариантов по ранговому методу

Выводы. По результатам исследования двухлетних культур следует отметить, что высаженные растения имеют хорошие показатели по увеличению темпов роста во всех вариантах опыта. По показателям приживаемости дисперсионный анализ показал, что доказано влияние вида субстрата на приживаемость по вариантам опыта $F_{расч.} > F_{табл.}$. Доля влияния фактора 75,93 %. По показателям растений: высота надземной части, прирост высоты и диаметр корневой шейки – различия не существенны. Влияние вида субстрата на данные параметры не доказано. Закономерность поражения растений мучнистой росой от вида субстрата не была выявлена.

Выявлена зависимость приживаемости растений в опытных культурах и плотности сложения субстрата в вариантах опыта. Оптимальная плотность сложения находится в пределах от 0,4-0,6 г/см³. Также выявлена зависимость кислотности почвенного раствора субстрата (рН солевой вытяжки) и приживаемости растений в лесных культурах. Оптимальный уровень кислотности используемых субстратов от 5,0-6,5.

По комплексу показателей, имеющих влияние на рост дуба в теплице и в лесных культурах были определены оптимальные варианты субстрата: 3 – субстрат, изготовленный в Ботаническом саду-институте ПГТУ, состоящий из песка, торфа и биогумуса; 8 – переходный торф Параньгинского торфопредприятия РМЭ, заготовленный в 2010 году и хранившийся без укрытия в течение 3 лет. Для получения более достоверных данных необходимо продолжить исследования.

Библиографический список

1. Бартенев, И.М. К вопросу создания лесных культур посадкой ПМЗК: машины и оборудования / И.М. Бартенев. – Лесотехнический журнал. – 2013. – №2. – 123 с.
2. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М.: Колос, 1979. – 416 с.
3. Краснов, В. Г. Санитарное состояние искусственных насаждений дуба черешчатого в Среднем Поволжье / В. Г. Краснов, В. Ф. Краснова, И. А. Алексеев, А. С. Яковлев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2007. – №. 6. – С. 42-48.
4. Курбанов, Э.А. Пространственная динамика фитомассы березняков на бывших сельскохозяйственных землях Марийского Заволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, Л.С. Устюгова и др. // Лесной журнал. – Архангельск: Архангельский государственный технический университет. – 2010. – №3. – С. 8-14.
5. 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.
6. Лакин, Г. Ф. Биометрия: Учеб. пособие для биол. спец. вузов. – М. Высш. школа, 1990. – 352 с.
7. Лосицкий, К.Б. Дуб / К.Б. Лосицкий. – Москва: Лесная промышленность, 1981. – 101 с.
8. Об утверждении Правил лесовосстановления: приказ Минприроды России от 29.06.2016 No. 375 (Зарег. в Минюсте России 15.11.2016 No. 44342) (ст. 1).
9. Пчелин, В. И. Дендрология: Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2007. – 520 с.
10. Романов, Е. М. Выращивание однолетних семян дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) с закрытой корневой системой на различных питательных субстратах / Е. М. Романов, М. И. Смышляева, В. Г. Краснов, Д. И. Мухортов // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2017. – №3 (35). – С. 26-36.
11. Романов, Е. М. Субстраты на основе органических отходов для выращивания семян в контейнерах / Е. М. Романов, Д. И. Мухортов, А. В. Ушнурцев, В. В. Ускова / Лесное хозяйство. – 2009. – № 2. – С. 35-37.

12. Рыбаков, К.В. Приживаемость и рост однолетних опытных культур дуба черешчатого, созданных сеянцами с закрытой корневой системой / К.В. Рыбаков, В.Г. Краснов, С.В. Кириллов, М.И. Смышляева // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы четвертой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Петрозаводск: ПетрГУ. – 2018. – С. 150-151.
13. Смышляева, М. И. Особенности выращивания сеянцев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) с закрытой корневой системой в условиях Республики Марий Эл / М. И. Смышляева, Е. М. Романов, В. Г. Краснов // «Инновации и технологии в лесном хозяйстве 2016» ИТФ-2016: тезисы докладов V Международной научно-практической конференции, 31 мая-2 июня 2016 г., Санкт-Петербург, ФБУ «СПбНИИЛХ». – СПб: СПбНИИЛХ, 2016. – С. 131.
14. Смышляева, М.И. Показатели роста сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой в лабораторных условиях / М.И. Смышляева, В.Г. Краснов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – 2015. – № 2. – Ч. 1 (13-1). – С. 112-116.
15. Усольцев, В.А. Лесные арабески, или Этюды из жизни наших деревьев / В.А. Усольцев. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2014. – 161 с.
16. Ширнин, В.К. Лесовосстановление дуба черешчатого сеянцами с закрытой корневой системой / В.К. Ширнин, В.А. Кострикин, Л.В. Ширнина, С.А. Крюкова // Лесной журнал. – 2017. – № 2. – С. 32–41.
17. Яковлев, А.С. Дубравы Среднего Поволжья / А.С. Яковлев, И.А. Яковлев. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1999. – 352 с.
18. Bobiec, A. Seeing the oakscapes beyond the forest: a landscape approach to the oak regeneration in Europe / A. Bobiec, A. Reif, & K. Öllerer // *Landscape Ecol* 33. – 2018. – P. 513–528.
19. Chirino, E. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in *Quercus suber* L. seedlings for reforestation in Mediterranean climate / E. Chirino, A. Vilagrosa, E.I. Hernandez, A. Matos, V.R. Vallejo // *Forest Ecology and Management*. – 2008. – № 256. – P. 779-785.
20. Gil-Pelegrn E. Tree Physiology. Vol. 7 - Oaks Physiological Ecology. Exploring the Functional Diversity of Genus *Quercus* L. [Electronic resource] / E. Gil-Pelegrn, J.J. Peguero-Pina, D. Sancho-Knapik. – 2017. – URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69099-5>. - 15.05.19.
21. Hanewinkel, M. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land / M. Hanewinkel, D.A. Cullman, M.J. Schelhaas, G.J. Nabuurs, N.E. Zimmermann // *Nature Climate Change*. – 2013. – P. 203–207.
22. Kohmann, K. Hot-water Treatment for Sanitizing Forest Nursery Containers; Effects on Container Microflora and Seedling Growth / K. Kohmann, I. Börja // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2002. – No. 17. – P.111-117.
23. McRae, J. Container Hardwood Seedling Production / J. McRae // *USDA Forest Service Proceedings*. – 2005. – No. 35. – P.26-27.
24. Mucha, J. Functional response of *Quercus robur* L. to taproot pruning: a 5-year case study / J. Mucha, A. Jagodziński, B. Bułaj, P. Łakomy, A. Talaśka, J. Oleksyn, Marcin Zadworny // *Annals of Forest Science*. – 2018. – № 75. – 22 p.
25. Rantala, J. Economic evaluation of container seedling packing and disinfection machinery / J. Rantala, K. Väättäinen, N. Kiljunen, P. Harstela // *Silva Fennica*. – 2003. – № 37(1). – P.121–127.
26. Salifu, K.F. Nursery Nitrogen loading improves field performance of bareroot oak seedlings planted on abandoned mine lands / K.F. Salifu, D.F. Jacobs, Z. K. Bryant // *Restoration Ecology*. – 2009. – No. 17(3). – P. 339–349.
27. Tsakalimi, M. Root morphology, stem growth and field performance of seedlings of two Mediterranean evergreen oak species raised in different container types / M. Tsakalimi, T. Zagas, T. Tsitsoni, P. Ganatsas // *Plant and Soil*. – 2005. – No. 278. – P. 85-93.

References

1. Bartenev I. M. K voprosu sozdaniya lesnykh kul'tur posadkoi PMZK: mashiny i oborudovaniya [On the issue of creating forest crops planting PMZK: machinery and equipment], *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry magazine], 2013, No.2, 123 p.
2. Dospekhov, B. A. Metodika polevogo opyta [Field Experience Methodology], Moskva: Kolos, 1979, 416 p.
3. Krasnov, V. G., Krasnova V. F., Alekseev I. A., Yakovlev A. P. Sanitarnoe sostoyanie iskusstvennykh nasazhdenii duba chereschatogo v Srednem Povolzh'e [The sanitary state of artificial plantations of oak in the Middle Volga], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Lesnoi zhurnal* [Higher Education News, Forest Journal], 2007, No. 6, pp. 42-48.
4. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Ustyugova L.P. i dr. Prostranstvennaya dinamika fitomassy bereznyakov na byvshikh sel'skokhozyaistvennykh zemlyakh Mariiskogo Zavolzh'ya [Spatial dynamics of phytomass of birch forests on the former agricultural lands of the Mari Zavolgie region], *Lesnoi zhurnal* [Forest magazine], Arkhangel'sk: Arkhangel'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010, No.3, pp. 8-14.
5. Kurbanov E.A., Vorobiev O.N. Lesovodstvo. Mezhdunarodnoe lesnoe khozyaistvo [Forestry. International forestry], Yoshkar-Ola:PGTU, 2014, 254 p.
6. Lakin G. F. Biometriya [Biometrics], Moskva, 1990, 352 p.
7. Lositskii K.B. Dub [Oak], Moskva, 1981, 101 p.
8. Ob utverzhdenii Pravil lesovosstanovleniya: prikaz Minprirody Rossii ot 29.06.2016 No. 375 [On approval of the Forest Reforestation Rules: order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated June 29, 2016 No. 375] (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 15.11.2016 No. 44342) (p. 1).
9. Pchelina V. I. Dendrologiya [Dendrology], Ioshkar-Ola, 2007, 520 p.

10. Romanov E. M., Smyshlyaeva M. I., Krasnov V. G., Mukhortov D. I. Vyrashchivanie odnoletnikh seyantsev duba chereschatogo (*Quercus robur* L.) s zakrytoi kornevoi sistemoi na razlichnykh pitatel'nykh substratakh [Growing annual seedlings of oak oak (*Quercus robur* L.) with a closed root system on various nutrient substrates], *Vestnik PGTU. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature management], 2017, No. 3 (35), pp. 26-36.
11. Romanov E. M., Mukhortov D. I., Ushnurtsev A. V., Uskova V. V. Substraty na osnove organicheskikh otkhodov dlya vyrashchivaniya seyantsev v konteynerakh [Organic waste substrates for growing seedlings in containers], *Lesnoe khozyaistvo* [Forestry], 2009, No. 2, P. 35-37.
12. Rybakov K.V., Krasnov V.G., Kirillov P.V, Smyshlyaeva M.I. Prizhivaemost' i rost odnoletnikh opytnykh kul'tur duba chereschatogo, sozdannykh seyantsami s zakrytoi kornevoi sistemoi [The survival and growth of annual experimental crops of oak oak, created by seedlings with a closed root system], *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa* [Improving the efficiency of the forest complex], Proc. 4rd International Conference, Petrozavodsk, PetrGU, 2018, pp. 150-151.
13. Smyshlyaeva M. I., Romanov E.M., Krasnov V. G. Osobennosti vyrashchivaniya seyantsev duba chereschatogo (*Quercus robur* L.) s zakrytoi kornevoi sistemoi v usloviyakh Respubliki Marii El [Features of growing seedlings of oak (*Quercus robur* L.) with a closed root system in the Republic of Mari El], "*Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyaistve 2016*" [Innovations and Technologies in Forestry 2016] ITF-2016, Book of Abstracts Proc.. 5rd International Conference, Sankt-Peterburg, FBU «SPbNIILKh», SPb: SPbNIILKh, 2016, 131p.
14. Smyshlyaeva M.I., Krasnov V.G. Pokazateli rosta seyantsev duba chereschatogo s zakrytoi kornevoi sistemoi v laboratornykh usloviyakh [Laboratory growth rates of seedlings of oak oak with a closed root system], *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], Voronezh, FGBOU VPO «VGLTA», 2015, No. 2, Vol. 1, pp. 112 – 116.
15. Usoltsev V.A. Lesnye arabeski, ili Etyudy iz zhizni nashikh derev'ev [Forest arabesques, or Etudes from the life of our trees], Ekaterinburg, Ural'skii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet, 2014,161 p.
16. Shirnin V.K., Kostrikin V.A., Shirnina L.V., Kryukova P.A. Lesovosstanovlenie duba chereschatogo seyantsami s zakrytoi kornevoi sistemoi [Reforestation of oak oak seedlings with a closed root system], *Lesnoi Zhurnal* [Forest Journal], 2017, No. 2, pp. 32–41.
17. Yakovlev A.P., Yakovlev I.A. Dubravy Srednego Povolzh'ya [Oaklands of the Middle Volga], Ioshkar-Ola: MarGTU, 1999, 352 p.
18. Bobiec A., Reif A., K. Öllerer Seeing the oakscape beyond the forest: a landscape approach to the oak regeneration in Europe., A. Bobiec, *Landscape Ecology*, 2018, No. 33, pp. 513-528.
19. Chirino E., Vilagrosa A., Hernarndez E.I., Matos A., Vallejo V.R. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in *Quercus suber* L. seedlings for reforestation in Mediterranean climate, *Forest Ecology and Management*, 2008, No. 256, pp. 779-785.
20. Gil-Pelegrn E., Peguero-Pina J.J., Sancho-Knapik D. Tree Physiology. Vol. 7, Oaks Physiological Ecology. Exploring the Functional Diversity of Genus *Quercus* L. [Electronic resource], URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69099-5>, 15.05.19.
21. Hanewinkel M., Cullman D.A., Schelhaas M.J., Nabuurs G.J., Zimmermann N.E. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land, M. Hanewinkel, *Nature Climate Change*, 2013, pp. 203–207.
22. Kohmann K., Börja I. Hot-water Treatment for Sanitizing Forest Nursery Containers; Effects on Container Microflora and Seedling Growth, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2002, No. 17, pp. 111-117.
23. McRae J. Container Hardwood Seedling Production , *USDA Forest Service Proceedings*, 2005, No. 35, pp. 26-27.
24. Mucha J., Jagodziński A., Bułaj B., Łakomy P., Talaśka A., Oleksyn J., Zadworny M. Functional response of *Quercus robur* L. to taproot pruning: a 5-year case study, *Annals of Forest Science*, 2018, No. 75, 22 p.
25. Rantala J., Väätäinen K., Kiljunen N., Harstela P. Economic evaluation of container seedling packing and disinfection machinery, *Silva Fennica*, 2003, No. 37(1), pp.121-127.
26. Salifu K. F., Jacobs D. F., Birdge Z. K. D. Nursery Nitrogen Loading Improves Field Performance of Bareroot Oak Seedlings Planted on Abandoned Mine Lands , *Restoration Ecology*, 2009, No. 17 (3), pp. 339-349.
27. Tsakalimi M., Zagas T., Tsitsoni T., Ganatsas P. Root morphology, stem growth and field performance of seedlings of two Mediterranean evergreen oak species raised in different container types, *Plant and Soil*, 2005, No. 278, pp. 85-93.

ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОДООХРАННЫХ ЛЕСОВ

Л. В. Тарасова, А. С. Зорина

Поволжский государственный технологический университет

Представлен обзор отечественных и зарубежных статей по вопросам проведения оценки и мониторинга водоохраных лесов с применением данных дистанционного зондирования. Лесные насаждения, расположенные вдоль русел рек и других водоемов, играют важную роль в сохранении и поддержании экосистем. Основными задачами настоящего исследования являются: проведение анализа подходов к исследованию прибрежных лесов с использованием спутниковых данных; рассмотрение методов тематического картографирования для изучения состава, структуры наземного покрова и обнаружения изменений, степени его нарушения, исследование методики оценки влияния различных факторов на пойменные экосистемы и последствий выявленных тенденций. Объектом исследования служат защитные лесные насаждения, произрастающие вдоль различных водоемов на территории разных стран мира. Спутниковая система Landsat широко используется в дистанционном мониторинге прибрежных территорий, а появление системы Sentinel значительно расширяет возможности оценки и анализа лесного покрова за счет широкого охвата территории и высокого пространственного и временного разрешения. Применение индексных изображений позволяет более точно выделить основные классы наземного покрова прибрежных территорий, таких как растительность, водные объекты, объекты застройки. Анализ подходов к исследованию прибрежных лесов по спутниковым данным показал, что учеными используются различные методики тематического картографирования с использованием как управляемой, так и неуправляемой классификации. Также исследователями широко применяются гибридные подходы – сочетание нескольких способов классификации и индексных изображений. Исследование изменений наземного покрова по спутниковым данным эффективно проводится с помощью ландшафтных индексов, позволяющих проанализировать разнообразие, структуру лесной растительности и степень её фрагментации. С помощью оценки эколого-хозяйственного баланса можно установить сбалансированность различных видов деятельности и интересов различных групп населения на территории с учетом потенциальных и реальных возможностей экосистем. Статья носит обзорный характер и будет интересна тем, кто занимается дистанционным мониторингом окружающей среды.

Ключевые слова: лесные насаждения, дистанционное зондирование; спутниковые данные, ландшафтное разнообразие, ландшафтные метрики; эколого-хозяйственный баланс.

REMOTE SENSING FOR MONITORING WATER-CONSERVATION FORESTS

L. V. Tarasova, A. S. Zorina

Volga State University of Technology

The article reviews national and international research papers concerning the assessment and monitoring of water conservation forests using remote sensing data. Forest stands located along riverbeds and other water reservoirs play an important role in the conservation and maintenance of ecosystems. The main objective of this paper is to analyze the approaches to coastal forests using satellite data. For the purpose of the current research we used the method of thematic mapping to study the composition, structure and changes of land cover, and the degree of its disturbance. We also investigated the methods of assessing the impact of various factors on floodplain ecosystems and the consequences of the identified trends. The research focuses on protective forest plantations that grow along various reservoirs in different countries of the world. The Landsat satellite system is widely used in remote sensing of coastal areas, and the advent of the Sentinel system significantly

expands the functional capacity of assessment and analysis of forest cover due to wide coverage and high spatial and temporal resolution. The use of index images allows to identify the main classes of land cover of coastal areas including vegetation, water bodies, and building sites. The analysis of approaches to coastal forest research based on satellite data has proved that scientists use different methods of thematic mapping employing both supervised and unsupervised classification. A hybrid approach is also widely used by scholars, when several methods of classification and index images are combined together. The dynamics of land cover tracked down by satellite data is effectively carried out using landscape indices that allow to analyze the diversity and the structure of forest vegetation, as well as the degree of its fragmentation. By assessing environmental and economic issues, it is possible to find the balance between the various activities and interests of different groups of stakeholders, taking into account the capacity of ecosystems. The paper may represent interest for specialists engaged in remote sensing of environmental monitoring.

Keywords: *forestry; remote sensing; landscape diversity; landscape metrics; ecological and economic balance.*

Введение. Площади лесных насаждений, расположенных вдоль русел рек и других водоемов, занимают небольшую территорию всей площади суши, тем не менее, их роль в сохранении и поддержании этих экосистем чрезвычайно важна и представляет большой интерес для широкого круга исследователей (Congalton et al., 2002; Войтко, 2009; Макеева, 2016; Gilbert et al., 2016, Lee, 2019). Интенсивное антропогенное воздействие на защитные леса в разных регионах мира приводит к их сокращению и исчезновению (Weissteiner et al., 2016; Msofe et al., 2019; Pontes et al., 2019). Такие нарушения приводят к увеличению разрушительной силы рек, их осушению, размыванию берегов и смене растительного состава. Исследования, посвященные прибрежным экосистемам, затрагивают различные аспекты, а также используют широкий спектр экологических моделей и функций в зависимости от климатических, морфологических условий и условий землепользования (Невидомов, 2004; Черненькова, 2009; Ledesma, 2018; Dufour et al., 2019).

Детальное изучение изменений и состояния лесных насаждений в поймах рек методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) может способствовать разработке более эффективных мер по сохранению и восстановлению таких ландшафтов.

Цель работы – провести анализ состояния вопроса по использованию ДЗЗ при оценках и мониторинге защитных лесных насаждений вдоль русел рек и других водоемов.

Для решения этой цели были поставлены следующие задачи:

- провести анализ подходов к исследованию прибрежных лесов с использованием спутниковых данных;
- рассмотреть методы тематического картирования для изучения состава и структуры наземного покрова территорий, граничащих с водоемами;
- исследовать методики оценки влияния различных факторов на пойменные экосистемы.

Объекты и методика исследований

Объектом исследования явились защитные лесные насаждения, произрастающие вдоль различных водоемов на территории разных стран. В работе были проанализированы существующие методики оценки и мониторинга состояния таких экосистем с использованием изображений ДЗЗ.

Результаты исследования

На сегодняшний день для мониторинга прибрежных лесов широко используются спутниковые снимки системы Landsat (Renó et al., 2016; Курбанов и др., 2014; Павлюк и др. 2017),

что объясняется доступностью данных снимков, а также возможностью оценивания с их помощью данных за несколько десятилетий. Для детального исследования и анализа валидации используются снимки высокого разрешения спутников RapidEye (Gärtner et al., 2016) и Quick Bird (Заплавнов, 2015; Воробьев, Курбанов, 2014). Однако с появлением системы Sentinel возможности оценки и анализа лесного покрова значительно увеличились (Родионова, 2017; Mleczo, Mróz, 2018; Воробьев и др., 2019а). Система этих спутников европейской программы Copernicus сочетает в себе широкий охват территории и высокое пространственное и временное разрешение.

Индексные изображения

Наземный покров на прибрежных территориях характеризуется чаще всего наличием таких основных элементов, как растительность, водоемы и объекты застройки. Для более точного картирования этих объектов исследователями используются несколько основных индексов: *вегетационные* (Полевщикова, 2016; Курбанов и др., 2016), *водные* (McFeeters, 1996; Xu, 2006), *застройки* (Козлов, 2006; Евдокимов, Михалап, 2015).

Существует большое число вегетационных индексов. Выбор того или иного вегетационного индекса обусловлен прежде всего разреженностью растительности, состоянием атмосферы, особенностями почвы и рельефом. Наиболее используемым вегетационным индексом является *нормализованный относительный индекс растительности* NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы. NDVI может быть получен на основе любых снимков высокого, среднего или низкого разрешения, имеющих спектральные каналы в красном и инфракрасном диапазоне (Mendez-Estrella et al., 2016; Taufik, Ahmad, 2016; Woodward et al., 2018). Основным его недостатком является, что NDVI не стоит применять, если растительность достаточно разрежена и составляет менее 30 % в структуре наземного покрова. В таких случаях обычно исследователями используется усовершенствованный вегетационный индекс EVI (Enhanced Vegetation Index). Особенностью вегетационного индекса EVI является чувствительность значений показателя к условиям окружающей среды, в которых произрастает растительность, что необходимо при оценке динамического ряда изменений в структуре полога (Воробьев и др., 2019б).

Прибрежная лесная растительность часто уничтожается в результате застройки прибрежных населенных пунктов. Поэтому ряд исследователей при анализе водоохранных зон применяют индексы застройки, в частности *нормализованный дифференциальный индекс застроенности земельных участков* NDBI (Normalized Difference Built-up Index), рассчитываемый с использованием коротковолнового инфракрасного канала SWIR и ближнего инфракрасного NIR (Козлова и др., 2018).

Сочетание данных индексов позволит наиболее точно выделить лесную растительность, водные объекты, объекты застройки.

Классификация изображений

Следующая группа исследований посвящена тематической классификации снимков, на основании которой можно будет судить о динамике изменения лесного покрова, уровне нарушенности и экологической устойчивости территории (Курбанов и др., 2015). Так, для анализа ландшафтных тенденций в прибрежных экосистемах Мексики (Mendez-Estrella et al., 2016) была применена управляемая классификация на основе дерева решений CART (Classification and Regression Tree). Для изучения динамики наземного покрова в бассейне реки Бинах за 1972-2013 гг. использовались методы объектно-ориентированной классификации в программном обеспечении ILMSimage (Badjana et al., 2015). При исследовании влияния фрагментации пойменных лесов Нижней Амазонки на биоразнообразие и экосистемные услуги для жителей прибрежных районов ученые также применяли методы объектно-

ориентированной управляемой классификации в программном обеспечении eCognition (Renó et al., 2016).

Для классификации наземного покрова долины реки Кланг (Малайзия) методом нейронных сетей на основе адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (ANFIS – Adaptive neuro fuzzy inference system) был использован *нормализованный разностный индекс воды* (NDWI), *стандартизованный индекс различий застройки* (NDBI), *нормализованный разностный вегетационный индекс* (NDVI) (Taufik, Ahmad, 2016). Также для классификации спутниковых данных учеными применяются алгоритмы машинного обучения «случайный лес» (RF – random forest) (Картиев, Курейчик, 2016). Данный алгоритм был использован исследователями для выделения прибрежных коридоров и картирования прибрежной растительности в бассейне реки Колорадо, где в качестве экологических предикторов были выбраны спектральные полосы от Landsat 8 OLI / TIRS (красный, зеленый, синий, ближний инфракрасный, коротковолновый инфракрасный и тепловой диапазоны), NDVI, почвенный скорректированный индекс растительности SAVI, модифицированный нормализованный разностный индекс воды mNDWI, топографические параметры (уклон, высота), индексы Tasseled Cap (яркость, зеленость, влажность) (Woodward et al., 2018).

Некоторые исследователи используют оба метода классификации (гибридный подход). При разработке алгоритма автоматизированного картографирования состояния и динамики лесов Среднего Приангарья по цифровой модели рельефа (SRTM 90m) и данным мультиспектральной космической съемки (Landsat ETM+) в начале была проведена неуправляемая классификация (кластеризация) данных с использованием метода ISODATA, а затем сигнатуры, полученные в результате неё, использовали как обучающие выборки для выполнения управляемой классификации методом максимального правдоподобия (Данилова и др., 2010). Al-Fares (2013) для анализа изменений наземного покрова в бассейне реки Евфрат использовал неуправляемую классификацию ISODATA и различные методы управляемой классификации, такие как дерево решений, максимального правдоподобия (MLC – Maximum Likelihood Classifier, нейронных сетей (ANN – Artificial Neural Networks), опорных векторов (SVM – Support Vector Machine). В исследовании динамики наземного покрова в дельте Ганга, Бангладеш также была применена неуправляемая классификация на основе K-means и управляемая классификация MLC (Saifuzzaman, 2015). При картографировании водно-болотных угодий на Бебжинской пойме (Польша) с использованием данных SAR (Sentinel-1A и TanDEM-X) ученые применили неуправляемую классификацию ISODATA и управляемую классификацию SVM (Mieczko, Mróz, 2018).

Оценка изменений в растительном покрове

Существуют различные подходы к анализу влияния природных и антропогенных факторов на растительный покров (Усова, 2007; Гусев, Шпилевская, 2014; Xu et al., 2017; Lee, Abdullah, 2019). Основными оцениваемыми параметрами при этом являются изменение площади и конфигурации леса, степень фрагментации. Достаточно подробно они изучаются с точки зрения ландшафтного подхода (Черных и др., 2015; Walz, Syrbe, 2018; Zhang et al., 2018).

В таблице 2 представлены основные ландшафтные метрики, используемые российскими и зарубежными учеными для анализа ландшафтного разнообразия и структуры лесного покрова в бассейнах рек с применением данных ДЗЗ (Mhangara, Kakembo, 2012; Воробьев и др., 2015; Riedler et al., 2015; Sertel et al., 2018).

Расчет ландшафтных индексов позволят сделать вывод о структуре наземного покрова на исследуемой территории, проанализировать фрагментированность и устойчивость лесного покрова.

Российскими учеными разработаны концепция эколого-хозяйственного баланса территории (ЭХБ) и методические подходы для её оценки (Кочуров, 1999; Помазкова, Фалейчик, 2018). Данная методика позволяет оценить антропогенную нагрузку от сложившейся струк-

Основные ландшафтные метрики

Метрика	Описание метрики
AREA	Средняя площадь ареала какого-либо типа землепользования в ландшафте
ED (Edge Density)	Отношение суммы длин границ ареалов землепользования в ландшафте к его общей площади
ENN (Euclidean Nearest Neighbor Distance Area-Weighted Mean)	Среднее значение расстояния до ближайшего ареала того же типа
IJI (Interspersion–juxta position index)	Степень пересечения патчей одного класса со всеми другими классами (этот индекс принимает значения от 0, когда класс найден только один, другой тип класса, смежный и увеличивается до 100, когда тип патча все больше перемежается с другими типами классов).
LPI (Largest Patch Index)	Удельная площадь самого большого ареала какого-либо типа землепользования
LSI (Landscape Shape Index) – метрика формы	Стандартизированное отношение суммы длин границ ареалов к квадратному корню из общей площади ландшафта
MNN (Mean Nearest-Neighbour)	Значение среднего расстояния до ближайшего соседа в метрах между участками одного класса (на уровне класса) или разных классов (на ландшафтном уровне)
MSI (Mean Shape Index)	Сумма периметра каждого участка, деленная на квадратный корень площади участка (га) для каждого класса (уровень класса) или всех участков (уровень ландшафта) и скорректированная на круговой стандарт (полигоны) или квадратный стандарт (сетки), деленная на количество патчей
MPS (Mean Patch Size)	Средний размер участка для каждого вида наземного покрова
MESH (Effective Mesh Size)	Отношение суммы квадратов площадей всех ареалов к общей площади ландшафта (имеет максимальное значение, когда ландшафт представлен одним ареалом)
NP /NUMP (Number of Patches)	Количество участков (патчей) соответствующего типа
PD (Patch Density)	Количество патчей соответствующего типа (класса) патчей на единицу площади
PLAND (Percentage of Landscape)	Процент определенного типа землепользования в ландшафте
PROX±MN /MPI (Mean Proximity Index)	Близость всех участков, края которых находятся в пределах заданного радиуса поиска фокального участка
SHDI (Shannon's Diversity Index) – индекс разнообразия Шеннона	Основан на формуле энтропии, учитывает однородность распределения типов наземных покровов
SIDI – (Simpson's diversity index) индекс разнообразия Симпсона	Используется в экологии для оценки биоразнообразия внутри экосистемы. В математическом анализе морфологии ландшафтов этот индекс может быть применён для оценки вероятности принадлежности к различным типам геосистем любых двух ландшафтных контуров, случайно отобранных из неопределённо большого их числа.
SHEI (Shannon's Evenness Index) – индекс равномерности Шеннона	Равномерность участков по наземному покрову на основе количества и распределения участков
SPLIT (Splitting Index)	Отношение площади ландшафта к сумме квадратов площадей всех ареалов
TE (Total Edge)	Сумма длин всех краевых сегментов в ландшафте

туры землепользования региона. Эколого-хозяйственный баланс (ЭХБ) – это сбалансированное соотношение различных видов деятельности и интересов различных групп населения на территории с учетом потенциальных и реальных возможностей экосистем, что обеспечивает воспроизводство природных ресурсов с наименьшими экологическими изменениями и последствиями (Кочуров, 1999). При оценке ЭХБ учитываются следующие характеристики:

- распределение земель по категориям и видам, площадь земель, степень антропогенной нагрузки;
- площадь природоохранных зон;
- напряженность эколого-хозяйственного состояния территории;
- интегральная антропогенная нагрузка;
- природная защищенность территории;
- экологический фонд территории.

Данная методика была использована в исследованиях различных территорий РФ с учетом особенностей той или иной местности (Абрамова, 2011; Минников, Куролап, 2013; Помазкова, Фалейчик, 2018). Оценка ЭХБ проводилась при этом с применением кадастровой информации об объектах исследуемых территорий. Однако данные ДЗЗ также позволяют оценить площади различных классов и выделить территории с различной степенью антропогенной нагрузки.

Заключение

Были проанализированы подходы к исследованию защитных лесных насаждений с использованием спутниковых данных. Состав и структура прибрежной растительности находится под влиянием различных факторов как природных, так и антропогенных. Пойма водного объекта является очень динамичной системой, что приводит к сложности оценки взаимосвязи между факторами окружающей среды и ее растительного покрова. Для детального мониторинга динамики растительного покрова в такой экосистеме желательно использовать спутниковые данные высокого разрешения и закладывать большое число тестовых участков.

Также рассмотрены методы тематического картографирования для изучения состава, структуры наземного покрова поймы и обнаружения изменений с целью выявления динамики определенных типов наземного покрова и степени его нарушения. Большинство исследователей сочетает несколько методов классификации с применением различных индексных изображений. Изучены методики оценки влияния факторов на пойменную экосистему и последствий выявленных тенденций. Широко применяются ландшафтные показатели при оценке фрагментации прибрежных лесов. Для оценки устойчивости территории в целом с учетом потенциальных и реальных возможностей экосистем российскими исследователями широко применяется методика ЭХБ. Таким образом, применение спутниковых данных открывает широкие возможности исследования водоохраных лесов, позволяя оценивать их площадь, структуру и динамику. Использование спутниковых данных Sentinel повышает эффективность мониторинга водоохраных лесов. Применение индексных изображений и сочетание нескольких методов классификации увеличивают точность тематического картографирования.

Расчет ландшафтных индексов позволяет делать выводы о структуре наземного покрова на исследуемой территории, анализировать фрагментированность и устойчивость лесного покрова. Методика эколого-хозяйственного баланса может служить для оценки уровня антропогенной нагрузки от сложившейся структуры землепользования региона, сбалансированности соотношения различных видов деятельности и интересов различных групп населения.

Библиографический список

1. Абрамова, Л.А. Эколого-хозяйственный баланс территории и ее естественная защищенность / Л.А. Абрамова, М.В. Юшков, М.М. Кузьмина // Вестник российских университетов. Математика. – 2011. – №2. – С.575-576.
2. Войтко, П.Ф. Использование лесов Республики Марий Эл для строительства и эксплуатации искусственных водных объектов / П.Ф. Войтко // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2009. – №3. – С.75-83.
3. Воробьев, О.Н. Алгоритм определения фенологических характеристик лесного покрова на основе временных рядов спутниковых данных / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, Е.Н. Демишева, С.А. Меньшиков, Л.Н. Смирнова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2019а. – № 1(41). – С. 5-20.
4. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг городских лесов / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева, О.В. Коптелов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 1(25). – С. 5-21.
5. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем: монография / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, Е.Н. Демишева, С.А. Меньшиков, М.С. Али, Л.Н. Смирнова, Л.В. Тарасова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019б. – 166 с.
6. Воробьев, О.Н. Опыт применения снимков RapidEye для оценки недропользования в Республике Марий Эл / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Геоматика. – Москва: «Совзонд». – 2014. – № 1. – С. 80-86.
7. Гусев, А. П. Динамика структуры ландшафтного покрова и современное состояние лесных экосистем / А.П. Гусев, Н.С. Шпилевская // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – № 2. – С. 114 - 118.
8. Евдокимов, С.И. Определение физического смысла комбинации каналов снимков Landsat для мониторинга состояния наземных и водных экосистем / С.И. Евдокимов, С.Г. Михалап // Вестник Псковского государственного университета. Сер.: Естественные и физико-математические науки. – 2015. – №7. – С.21-32.
9. Заплавнов, Д. М. Геоинформационное картографирование защитных лесов Волго-Ахтубинской поймы: на примере Черноярского района Астраханской области: автореф. дис... канд. с.-х. наук / Д.М. Заплавнов. – Волгоград, 2015. – 20 с.
10. Картиев, С.Б. Алгоритм классификации, основанный на принципах случайного леса, для решения задачи прогнозирования / С.Б. Картиев, В.М. Курейчик // Программные продукты и системы. – 2016. – №2 (114). – С.11-15.
11. Козлов, Д.Н. Инвентаризация ландшафтного покрова методами пространственного анализа для целей ландшафтного планирования / Д.Н. Козлов // Ландшафтное планирование: общие основания, методология, технология: труды Международной школы-конференции «Ландшафтное планирование». – Москва, 2006. – С.117-137.
12. Козлова, М.В. Использование данных дистанционного зондирования Земли для изучения тундровых фитоценозов на примере водоохранных зон рек Ненецкого автономного округа / М.В. Козлова, Г.Ш. Турсунова, О.В. Горелиц, И.В. Землянов и др. // Экосистемы: экология и динамика. – 2018. – №1. – С. 92-111.
13. Кочуров Б. И. Геоэкология: экодиагностика и эколого-хозяйственный баланс территории / Б. И. Кочуров. – Смоленск: Смоленский государственный университет, 1999. – 154 с.
14. Курбанов, Э.А. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 36-48.
15. 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: ПГТУ, 2015. – 131 с.
16. 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.
17. Макеева, Е.Д. Исторические истоки современных экологических проблем Среднего Поволжья / Е.Д. Макеева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. –Т.18, №6. – С.93-99.
18. Минников, И.В. Оценка эколого-хозяйственного баланса территории Воронежской области / И.В. Минников, С.А. Куролап // Вестник ВГУ, Сер.: География. Геоэкология. – 2013. – № 1. –С.129-136.
19. Невидомов, А.М. Пойменное лесоводство – новый вид зонально-географических систем ведения лесного хозяйства / А.М. Невидомов // Известия ВУЗов. – Лесной журнал. – 2004. – №1. – С. 7-14.
20. Павлюк, Я.В. Фрагментация лесов верхней части бассейна реки Ворскла с конца XVIII века / Я.В. Павлюк, Э.А. Терехин, П.А. Украинский // Вестник Московского университета. Сер. : География. – 2017. – № 1. – С. 82-91.
21. Полевщикова, Ю. А. Пространственно-временной анализ динамики лесного покрова в Среднем Поволжье по спутниковым данным: автореф. дис... канд. с.-х. наук / Ю.А. Полевщикова. – Йошкар-Ола, 2016. – 22 с.
22. Помазкова, Н.В. Оценка эколого-хозяйственного баланса территории Забайкальского края / Н.В. Помазкова, Л.М. Фалейчик // Вестник ВГУ, Сер.: География. Геоэкология. – 2018. – № 2. – С.5-15.
23. Родионова, Н.В. Анализ изображений Sentinel 1 для весеннего паводка в Алтайском крае в апреле 2015 года и Рязанской области в апреле 2016 года / Н.В. Родионова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 1. – С. 136-146.

24. Усова, И.П. Оценка фрагментации лесов с использованием ландшафтных индексов (на примере восточно-белорусской ландшафтной провинции) / И.П. Усова // Актуальные проблемы геоботаники: материалы III Всероссийской школы-конференции. II часть. – Петрозаводск, 2007. – С. 250–253.
25. Черненкова, Т. В. Оценка биоразнообразия лесов наземными и дистанционными методами на основе ГИС-технологий / Т. В. Черненкова // Биосфера. – 2009. – №1. – С.93-100.
26. Черных, Д.В. Пространственно-временная динамика структуры ландшафтов в бассейне р. Касмала (Алтайский край) / Д.В. Черных, Р.Ю. Бирюков, Д.В. Золотов, Д.К. Першин и др. // Вестник алтайской науки. – 2015. – № 1. – С. 264 - 269.
27. Al-Fares, W. Historical Land use/ Land cover classification using Remote Sensing. Springer Briefs in Geography / W. Al-Fares. – Jena, 2013. – 204 p.
28. Badjana, H.M. Land cover changes assessment using object-based image analysis in the Binah River watershed (Togo and Benin) / H.M. Badjana, J. Helmschrot, P. Selsam, K. Wala, W.A. Flügel, A. Afouda et al. // Earth and Space Science. – 2015. – No. 2. – P.403–416.
29. Congalton, R.G. Evaluating remotely sensed techniques for mapping riparian vegetation / R. G. Congalton, K. Birch, J. Schriever // Computers and Electronics in Agriculture. – 2002. – Vol. 37. – P.113-126.
30. Dufour, S. Tracing the scientific trajectory of riparian vegetation studies: Main topics, approaches and needs in a globally changing world / S. Dufour, P.M. Rodríguez-González, M. Laslier // Science of The Total Environment. – Vol. 653. – 2019. – P.1168-1185.
31. Gärtner, P. The benefit of synthetically generated RapidEye and Landsat 8 data fusion time series for riparian forest disturbance monitoring / P. Gärtner, M. Förster, B. Kleinschmit // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 177. – P.237-247.
32. Gilbert, J.T. The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks / J.T. Gilbert, W.W. Macfarlane, J.M. Wheaton // Computers & Geosciences. – 2016. – Vol. 97. – P.1-14.
33. Ledesma, J.L.J. Towards an improved conceptualization of riparian zones in boreal forest headwaters / J.L.J. Ledesma M.N. Futter, M. Blackburn, F. Lidman, T. Grabs, R.A. Sponseller et al. // Ecosystems. – 2018. – Vol. 21, No. 2. – P. 297-315.
34. Lee, W.H. Framework to develop a consolidated index model to evaluate the conservation effectiveness of protected areas / W.H. Lee, S.A. Abdullah // Ecological Indicators. – 2019. – Vol. 102. – P. 131-144.
35. McFeeters, S.K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features / S. K. McFeeters // International Journal of Remote Sensing. – 1996. – No. 17. – P. 1425-1432.
36. Mendez-Estrella, R. Analyzing Landscape Trends on Agriculture, Introduced Exotic Grasslands and Riparian Ecosystems in Arid Regions of Mexico / R. Mendez-Estrella, J.R. Romo-Leon, A.E. Castellanos, F.J. Gandarilla-Aizpuro, K. Hartfieldet // Remote Sensing. – 2016. – Vol.8. – No. 8: 664. – P.1-19.
37. Mhangara, P. An object-based classification and fragmentation analysis of land use and cover change in the Keiskamma Catchment, Eastern Cape, South Africa / P. Mhangara, V. Kakembo // World Applied Sciences Journal. – 2012. – No. 19 (7). – P.1018-1029.
38. Mleczko, M. Wetland mapping using SAR data from the Sentinel-1A and TanDEM-X missions: a comparative study in the Biebrza Floodplain (Poland) / M. Mleczko, M. Mróz // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, No. 1:78. – P.1-19.
39. Msofe N.K. Land use change trends and their driving forces in the Kilombero Valley Floodplain, Southeastern Tanzania / N.K Msofe, L. Sheng, J. Lyimo // Sustainability. – 2019. – Vol. 11. – No. 2: 505. – P. 1-25.
40. Pontes, P.R.M. The role of protected and deforested areas in the hydrological processes of Itacaiúnas River Basin, eastern Amazonia / P.R.M. Pontes, R.B.L. Cavalcante, P.K. Sahoo, R.O. da Silva Júnior, M.S. da Silva, R. Dall'Agnol et al. // Journal of Environmental Management. – 2019. – Vol. 235. – P.489-499.
41. Riedler, B. A composite indicator for assessing habitat quality of riparian forests derived from Earth observation data / B. Riedler, L. Pernkopf, T. Strasser, S. Lang, G. Smith // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2015. –Vol.37. – P. 114-123.
42. Renó, V. Forest Fragmentation in the Lower Amazon Floodplain: Implications for Biodiversity and Ecosystem Service Provision to Riverine Populations / V. Renó, E. Novo, M. Escada // Remote sensing. – 2016. Vol. 8: 886, No. 11. – P. 1-26.
43. Saifuzzaman, Md. Land use and land cover dynamics in the Ganges delta region, Bangladesh / Md. Saifuzzaman // Thesis, Queen's University Kingston, Ontario, – 2015. – 150 p.
44. Sertel, E. Comparison of Landscape Metrics for Three Different Level Land Cover/Land Use Maps / E. Sertel, R.H. Topaloğlu, B. Şallı, I.Y. Algan, G.A. Aksu // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2018. – Vol. 7. – No. 10: 408. – P.1-21.
45. Taufik, A. Land cover classification of Landsat 8 satellite data based on Fuzzy Logic approach / A. Taufik, S.S. Syed Ahmad // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Kuala Lumpur, 2016. – Vol. 37, No. 1. – P. 1-7.
46. Walz, U. Landscape indicators – Monitoring of biodiversity and ecosystem services at landscape level / U. Walz, R.U. Syrbe // Ecological Indicators. – 2018. – Vol. 94, No. 2 – P.1-5.
47. Weissteiner, C.J. Europe's Green Arteries—A Continental Dataset of Riparian Zones / C.J. Weissteiner, M. Ickertott, H. Ott, M. Probeck, G. Ramminger, N. Clerici et al. // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8, No. 11. – P.1-27.
48. Woodward, B.D. CO-RIP: A riparian vegetation and corridor extent dataset for Colorado river basin streams and rivers / B.D. Woodward, P.H. Evangelista, N.E. Young, A.G. Vorster, A.M. West, S.L. Carroll et al. // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2018. – Vol. 7, No. 10: 397. – P.1-19.

49. Xu, F. Analysis of land-cover change (1963 – 2010) and environmental factors in the Upper Danube Floodplain / F. Xu, A. Otte, K. Ludewig, T.W. Donath, S. Harvolk-Schöning et al. // Sustainability. – 2017. – Vol. 9: 943, No. 6. – P. 1–37.
50. Xu, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery /H. Xu // International Journal of Remote Sensing. – 2006. – No. 27. – P. 3025–3033.
51. Zhang, X. Correlation Analysis between Landscape Metrics and Water Quality under Multiple Scales / X. Zhang, Y. Liu, L. Zhou // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2018. – Vol. 15, No. 8: 1606. – P.1-14.

References

1. Abramova L.A., Yushkov M.V., Kuz'mina M.M. Ekologo,khozyaistvennyi balans territorii i ee estestvennaya zashchishchennost' [Environmental and economic balance of the territory and its natural security], *Vestnik Rossiiskikh Universitetov, Matematika* [Bulletin of Russian Universities, Mathematics], 2011, No.2, pp. 575-576.
2. Vojtko P.F. Ispol'zovanie lesov Respubliki Marij Jel dlja stroitel'stva i jekspluatacii iskusstvennykh vodnykh ob'ektov [Use of Mari El Republic forests for building and exploitation of artificial water objects], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. EHkologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature management], 2009, No.3, pp.75-83.
3. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Demisheva E.N., Men'shikov S.A., Smirnova L.N. Algoritm opredelenija fenologicheskikh karakteristik lesnogo pokrova na osnove vremennykh rjadov sputnikovyykh dannykh [Algorithm for reviling the phenological parameters of forest cover on the base of time series of satellite data], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, Les. Jekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature management], 2019a, No. 1(41), pp. 5-20.
4. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V., Polevshhikova Ju.A., Demisheva E.N., Koptelov O.V. Distancionnyj monitoring gorodskikh lesov [Remote monitoring of urban forests], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. EHkologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature management], 2015, No. 1(25), pp. 5-21.
5. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Demisheva E.N., Men'shikov S.A., Ali M.S., Smirnova L.N., Tarasova L.V. Distancionnyj monitoring ustojchivosti lesnykh jekosistem [Remote monitoring of forest ecosystems sustainability], Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2019b, 166 p.
6. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A. Opyt primenenija snimkov RapidEye dlja ocenki nedropol'zovanija v Respublike Marij Jel [The experience of implementing RapidEye imagery for estimating subsoil in the Republic of Mari El], *Geomatika*, Moscow "Sovzond", No.1, 2014, pp. 80-86.
7. Gusev A. P., Shpilevskaya N.S. Dinamika struktury landshaftnogo pokrova i sovremennoe sostoyanie lesnykh ekosistem [Dynamics of structure of a landscape cover and contemporary state of wood ecosystems], *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and ecogeodynamics of regions], 2014, No. 2, pp. 114-118.
8. Evdokimov S.I., Mikhalap S.G. Opredelenie fizicheskogo smysla kombinatsii kanalov snimkov Landsat dlya monitoringa sostoyaniya nazemnykh i vodnykh ekosistem [Determination of physical meaning of band combinations of Landsat images for monitoring terrestrial and aquatic ecosystems], *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye i fiziko,matematicheskie nauki* [Bulletin of the Pskov State University. Ser.: Natural and physical, mathematical sciences], 2015, No.7, pp.21-32.
9. Zaplavnov D. M. Geoinformacionnoe kartografirovanie zashhitnykh lesov Volgo-Ahtubinskoj pojmy: na primere Chernojarskogo rajona Astrahanskoj oblasti: *avtoref. dis... kand. s.,kh. nauk* [Geoinformation mapping of protective forests of the Volga-Akhtuba floodplain: the example of the Chernoyarsk district of the Astrakhan region. *Cand. agri. sci. thesis*], Volgograd, 2015, 20 p.
10. Kartie S.B., Kureichik V.M. Algoritm klassifikatsii, osnovannyi na printsipakh sluchainogo lesa, dlya resheniya zadachi prognozirovaniya [Classification algorithm based on random forest principles for a forecasting problem], *Programmnye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 2016, No.2 (114), pp. 11-15.
11. Kozlov D.N. Inventarizatsiya landshaftnogo pokrova metodami prostranstvennogo analiza dlya tselei landshaftnogo planirovaniya [Landscape cover inventory by spatial analysis for landscape planning], *Landshaftnoe planirovanie: obshchie osnovaniya, metodologiya, tekhnologiya* [Landscape Planning: General Foundations, Methodology, Technology], Moskva, 2006, pp. 117-137.
12. Kozlova M.V. i dr. Ispol'zovanie dannykh distancionnogo zondirovaniya Zemli dlja izuchenija tundrovyykh fitocenzov na primere vodoohrannykh zon rek Neneckogo avtonomnogo okruga [The use of remote sensing data for studying tundra phytocenoses the example of water-protection zones of rivers Nenets Autonomous District], *Jekosistemy: jekologiya i dinamika* [Ecosystems: ecology and dynamics], 2018, No.1, pp. 92-111.
13. Kochurov B. I. Geoekologiya: ekodiagnostika i ekologo,khozyaistvennyi balans territorii [Geoecology: ecological diagnostics and ecological and economic balance of the territory], Smolensk, Smolensk State University, 1999, 154 p.
14. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshhikova Ju.A. Ocenka tochnosti i sopostavimosti tematiceskikh kart lesnogo pokrova raznogo prostranstvennogo razresheniya na primere Srednego Povolzh'ja [Assessment of accuracy and comparability of forest cover thematic maps of different spatial resolution by example of Middle Povolzhje], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2016, Vol. 13, No.1, pp. 36-48.
15. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Lezhnin S.A., Gubaev A.V., Polevshhikova Ju.A. Tematiceskoe kartirovanie rastitel'nogo pokrova po sputnikovym snimkam: validacija i ocenka tochnosti [Thematic mapping of vegetation by

- satellite imagery: validation and accuracy assessment], Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology, 2015, 131 p.
16. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshhikova Ju.A., Demisheva E.N. Chetyre desjatiletija issledovanij lesov po snimkam Landsat [Four decades of forest research with the use of Landsat images], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta, Ser.: Les. Jekologija. Prirodopol'zovani* [Bulletin of the Volga State Technological University, Ser. : Forest. Ecology. Natural resources], 2014, No. 1(21), pp. 18-32.
 17. Makeeva E.D. Istoricheskie istoki sovremennyh jekologicheskikh problem Srednego Povolzh'ja [The historical origins of the contemporary ecological problems of Middle Volga region], *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, Vol.18, No.6, pp. 93-99.
 18. Minnikov I.V., Kurolap S.A. Otsenka ekologo,khozyaistvennogo balansa territorii Voronezhskoi oblasti [Assessment of ecological and economic balance in the voronezh oblast], *Vestnik VGU, Ser.: Geografiya. Geoekologiya* [Bulletin of Voronezh State University, Series Geography Geoecology], 2013, No. 1, pp. 129-136.
 19. Nevidomov A.M. Poimennoe lesovodstvo – novyi vid zonal'no,geograficheskikh sistem vedeniya lesnogo khozyaistva [Floodplain Silviculture - New Type of Zonal-geographical Systems of Forest Management], *Lesnoi zhurnal* [Forest magazine], 2004, No.1, pp. 7-14.
 20. Pavlyuk Ya.V., Terekhin E.A., Ukrainskii P.A. Fragmentatsiya lesov verkhnei chasti basseina reki Vorskla s kontsa XVIII veka [Fragmentation of forests in the upper part of the Vorskla River basin since the end of the 18th century], *Vestnik moskovskogo universiteta, Ser.: Geografiya* [Bulletin of Moscow University, Ser. : Geography], 2017, No. 1, pp. 82-91.
 21. Polevshchikova Yu. A. Prostranstvenno,vremennoi analiz dinamiki lesnogo pokrova v Srednem Povolzh'e po sputnikovym dannym: avtoref. dis... kand. s.,kh. nauk [Space-time analysis of the dynamics of forest cover in the Middle Volga region using satellite data, *Cand. agri. sci. thesis*], Yoshkar-Ola, 2016, 22 p.
 22. Pomazkova N.V., Faleichik L.M. Otsenka ekologo,khozyaistvennogo balansa territorii Zabaikal'skogo kraja [Assessment of the ecological and economic balance of the Trans-Baikal region area], *Vestnik VGU, Ser.: Geografiya. Geoekologiya* [Bulletin of Moscow University, Ser. : Geography], 2018, No. 2, pp. 5-15.
 23. Rodionova N.V. Analiz izobrazhenij Sentinel 1 dlja vesennego pavodka v Altajskom krae v aprele 2015 goda i Rjazanskoj oblasti v aprele 2016 goda [Image analysis of Sentinel 1 for flood detection in Altai Region in April 2015 and Ryazan Region in April 2016], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 136-146.
 24. Usova I.P. Otsenka fragmentatsii lesov s ispol'zovaniem landshaftnykh indeksov (na primere vostochno,beloruskoj landshaftnoi provintsii) [Assessment of forest fragmentation using landscape indices (on the example of the East Belarusian landscape province)], *Proc. 3rd All-Russian Conference "Aktual'nye problemy geobotaniki"* [Proc. 3rd All-Russian Conference "Actual problems of geobotany"], Petrozavodsk, 2007, pp. 250-253.
 25. Chernen'kova T. V. Otsenka bioraznoobraziya lesov nazemnymi i distantsionnymi metodami na osnove GIS-tehnologii [Assessment of forest biodiversity by field and remote methods based on GIS technologies], *Biosfera* [Biosphere], 2009, No.1, pp. 93-100.
 26. Chernyh D.V., Ju R., Birjukov A.K., Zolotov D.V., Pershin D.K. i dr. Prostranstvenno,vremennaya dinamika struktury landshaftov v basseine r. Kasmala (Altaiskii kraj) [Spatio-temporal dynamics of landscape structure in the Kasmalariver basin (Altai Krai)], *Vestnik altaiskoi nauki* [Bulletin of Altai science], 2015, No. 1, pp. 264-269.
 27. Al-Fares,W. Historical Land use/ Land Cover Classification Using Remote Sensing, *Springer Briefs in Geography*, Jena, 2013, 204 p.
 28. Badjana H.M., Helmschrot J., Selsam P., Wala K., Flügel W.A., Afuda A. et al. Land cover changes assessment using object-based image analysis in the Binah River watershed (Togo and Benin), *Earth and Space Science*, 2015, No. 2, pp. 403–416.
 29. Congalton R.G., Birch K., Schriever J. Evaluating remotely sensed techniques for mapping riparian vegetation, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, Vol. 37, pp. 113–126.
 30. Dufour S., Rodríguez-González P.M., Laslier M. Tracing the scientific trajectory of riparian vegetation studies: Main topics, approaches and needs in a globally changing world, *Science of The Total Environment*, Vol.653, 2019, pp. 1168-1185.
 31. Gärtner P., Förster M., Kleinschmit B. The benefit of synthetically generated RapidEye and Landsat 8 data fusion time series for riparian forest disturbance monitoring, *Remote Sensing of Environment*, 2016,Vol. 177, pp. 237-247.
 32. Gilbert J.T., Macfarlane W.W., Wheaton J.M. The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks, *Computers & Geosciences*, 2016, Vol.97, pp. 1-14.
 33. Ledesma J.L.J., Futter M.N., Blackburn M., Lidman F., Grabs T., Sponseller R.A. et al. Towards an Improved Conceptualization of Riparian Zones in Boreal Forest Headwaters, *Ecosystems*, 2018, Vol. 21, No. 2, pp. 297-315.
 34. Lee W. H., Abdullah S. A. Framework to develop a consolidated index model to evaluate the conservation effectiveness of protected areas, *Ecological Indicators*, 2019,Vol. 102, pp. 131-144.
 35. McFeeters, S. K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 1996, No.17, pp. 1425--1432.
 36. Mendez-Estrella R., Romo-Leon J.R., Castellanos A.E., Gandarilla-Aizpuro F.J., Hartfieldet K. Analyzing Landscape Trends on Agriculture, Introduced Exotic Grasslands and Riparian Ecosystems in Arid Regions of Mexico, *Remote Sensing*, 2016, Vol.8, No. 8: 664, pp. 1-19.
 37. Mhangara P., Kakembo V. An Object-Based Classification and Fragmentation Analysis of Land Use and Cover Change in the Keiskamma Catchment, Eastern Cape, South Africa, *World Applied Sciences Journal*, 2012, No. 19 (7), pp. 1018-1029.

38. Mleczko M., Mróz M. Wetland Mapping Using SAR Data from the Sentinel-1A and TanDEM-X Missions: A Comparative Study in the Biebrza Floodplain (Poland), *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No.1:78, pp. 1-19.
39. Msofe N. K. J., Sheng L., Lyimo J. Land Use Change Trends and Their Driving Forces in the Kilombero Valley Floodplain, Southeastern Tanzania, *Sustainability*, 2019, Vol. 11, No.2: 505, pp. 1-25.
40. Pontes P.R.M., Cavalcante R.B.L., Sahoo P.K., da Silva Júnior R.O., da Silva M.S., Dall'Agnol R. et al. The role of protected and deforested areas in the hydrological processes of Itacaiúnas River Basin, eastern Amazonia, *Journal of Environmental Management*, 2019, Vol. 235, pp. 489-499.
41. Riedler B., Pernkopf L., Strasser T., Lang S., Smith G. A composite indicator for assessing habitat quality of riparian forests derived from Earth observation data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, Vol.37, pp. 114-123.
42. Renó V., Novo E., Escada M. Forest Fragmentation in the Lower Amazon Floodplain: Implications for Biodiversity and Ecosystem Service Provision to Riverine Populations, *Remote sensing*, 2016, Vol. 8: 886, No. 11, pp. 1–26.
43. Saifuzzaman Md. Land use and land cover dynamics in the Ganges delta region, Bangladesh, *Thesis*, Queen's University Kingston, Ontario, 2015, 150 p.
44. Sertel E., Topaloğlu H., Şallı B., Algan I.Y., Aksu G.A. Comparison of Landscape Metrics for Three Different Level Land Cover/Land Use Maps, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, Vol. 7, №10: 408, pp. 1-21.
45. Walz U., Syrbe R.-U. Landscape indicators – Monitoring of biodiversity and ecosystem services at landscape level, *Ecological Indicators*, 2018, Vol. 94, No.2, pp. 1-5.
46. Weissteiner C.J., Ickerott M., Ott H., Probeck M., Ramminger G., Clerici N. et al. Europe's Green Arteries—A Continental Dataset of Riparian Zones, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No.11, pp. 1-27.
47. Woodward B.D., Evangelista P.H., Young N.E., Vorster A.G., West A.M., Carroll S.L. et al. CO-RIP: A riparian vegetation and corridor extent dataset for Colorado river basin streams and rivers, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, Vol. 7, №10: 397, pp. 1-19.
48. Xu F., Otte A., Ludewig K., Donath T.W., Harvolk-Schöning S. et al. Analysis of land-cover change (1963 – 2010) and environmental factors in the Upper Danube Floodplain, *Sustainability*, 2017, Vol. 9: 943, No. 6, pp. 1–37.
49. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 2006, No. 27, pp. 3025--3033.
50. Zhang X., Liu Y., Zhou L. Correlation Analysis between Landscape Metrics and Water Quality under Multiple Scales, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, Vol. 15, No.8: 1606, pp. 1-14.

ДИНАМИКА NDVI РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ЛЕСОПАРКА ИМ. ЛЕСОВОДОВ БАШКИРИИ

З.З. Рахматуллин¹, И.Р. Рахматуллина², А.К. Габделхаков¹,
М.В. Мартынова¹, Р.Р. Султанова¹

¹Башкирский государственный аграрный университет

²Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы

Дистанционные методы зондирования Земли (ДЗЗ) в условиях большого объема данных о состоянии природных объектов и значительного усложнения теоретических проблем, требующих пространственного решения, приобретают все большее значение. Оценка природных систем на основе ДЗЗ позволяет провести всесторонний, системный анализ и синтез упорядоченных в пространстве и времени данных о населении, экономике, социальной сфере, природно-климатических, экологических и других разнообразных факторах. Целью исследования было проанализировать существующее состояние и динамику вегетационного индекса NDVI на примере лесопарка имени Лесоводов Башкирии. Для этого были использованы космические снимки Landsat за 1988 и 2017 гг., по которым определены NDVI растительного покрова исследуемого парка. Индексное изображение NDVI было получено с помощью инструмента Vegetation Index в программном пакете со свободной лицензией SAGA 7.2.0. Вегетационный индекс NDVI на полученной тематической карте сгруппирован в 8 классов с градацией от 0,25 до 0,8. Полученные результаты свидетельствуют о росте NDVI в нескольких классах за рассматриваемый период на исследуемой территории. Это можно объяснить увеличением со временем фитомассы насаждений и сомкнутости крон деревьев. Зависимости динамики вегетационного индекса от происхождения насаждений и их породного состава не выявлено. Тем не менее, увеличение распределения NDVI по площади на 2 и более классов прослеживается преимущественно в лиственных насаждениях; в хвойные насаждения за исследуемый период увеличение NDVI по площади произошло на 1 класс. Уменьшение этого вегетационного индекса в основном связано с проведенными в последние годы мероприятиями по благоустройству лесопарка.

Ключевые слова: NDVI, Landsat, SAGA, лесопарк, тематическая карта, таксационные показатели, лесные насаждения.

NDVI DYNAMICS OF VEGETATION COVER IN BASHKORTOSTAN URBAN FOREST

Z.Z.Rakhmatullin¹, I.R.Rakhmatullina², A.K. Gabdelkhakov¹,
M.V.Martynova¹, R.R.Sultanova¹

¹Bashkir State Agrarian University

²Bashkir State Pedagogical University n. a. M. Akmulla

Earth remote sensing methods in the conditions of the large amounts of data on the state of natural objects and a significant complication of theoretical problems that require direct solutions, come to the foreground of current research. Remote sensing of the natural systems provides a comprehensive and systematic analysis of the temporary and spatially ordered data on population, economy, social sphere, climate, environment and other factors. The purpose of our research was to analyze the current state and dynamics of the vegetation index NDVI in Bashkortostan urban forest. For this purpose we used Landsat satellite images for 1988 and 2017, and calculated vegetation indices of the area under study. NDVI index image was obtained using the Vegetation Index software package with free SAGA 7.2.0 license. The vegetation index NDVI on the resulting thematic map has been grouped into 8 classes with a gradation varying from 0.25 to 0.8. The obtained results indicate the growth of NDVI in several classes over the reference period and on the area under study. This can be explained by gradual increase in phytomass of plantations and the closeness of tree crowns over time. The dependence of the dynamics of the vegetation index on the origin of

plantations and their species composition has not been revealed. However, the increase in the distribution of NDVI by 2 or more classes has been registered mainly on deciduous plantations; while on coniferous plantations the increase in NDVI occurred over the study period by 1 class. The decrease in the vegetation index is observed primarily as a result of landscaping activities carried out in recent years in the urban forest.

Keywords: *NDVI, Landsat, SAGA, urban forest, thematic map, inventory indexes, forest plantations.*

Введение

В последние десятилетия исследования влияния изменения климата на лесные экосистемы представляют собой большой научный и практический интерес, что подтверждается Парижским соглашением по климату (Организация..., 2019). В таких исследованиях все большее значение приобретают методы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) и ГИС программы, которые позволяют выявлять и проводить мониторинг за лесным покровом больших территорий (Курбанов, 2016; Черепанов, Дружинина, 2009). ДЗЗ в условиях большого объема данных о состоянии природных объектов и значительного усложнения теоретических проблем, требующих пространственных решений, находят все большее применение. Картографирование природных систем позволяет провести всесторонний, системный анализ и синтез упорядоченных в пространстве и времени данных о населении, экономике, социальной сфере, природно-климатических, экологических и других разнообразных факторах (Курбанов и др., 2016, 2018; Рахматуллина и др., 2009, 2017). Эти технологии опираются на достижения в области дистанционного зондирования, математико-картографического моделирования и системного тематического картографирования (Курбанов и др., 2015; Loboda et al., 2017, Wen et al., 2018, Naithani et al., 2018, Adamczyk, Osberger, 2015).

Наличие большого числа архивных спутниковых снимков (временных рядов) Landsat дает большой шанс реконструировать лесные нарушения и историю изменений с высоким временным разрешением, средним пространственным разрешением и длительным периодом (Курбанов, 2014). В настоящее время применяется несколько методов обработки временных рядов. Пространственно-временной анализ городской растительности с использованием разновременных данных спутниковой системы Landsat и наземных измерений показал его высокую эффективность при оценке городского ландшафта (Ren et al., 2017). Тематическое картографирование также является комплексным инструментом анализа изменений в лесах тропических районов (Jiao et al., 2017). При оценке лесного покрова часто применяются вегетационные индексы, которые способствуют выявлению отклика на нарушенность растительности, вызванную различными антропогенными причинами (пешеходные маршруты, поселения, наводнения и пожары, разведка полезных ископаемых) (Yasmin et al., 2016).

Таким образом, в мировой практике при оценке современного состояния растительного покрова, его биоразнообразия, закономерностей пространственно-временной организации в условиях разной степени антропогенного воздействия широко используется ДЗЗ. Выполнять наблюдения за растительным покровом в широком диапазоне длин волн электромагнитного излучения, пространственного и временного разрешения позволяют технические возможности современных спутниковых систем дистанционного зондирования. В то же время возникновение многих экологически неблагоприятных факторов, влияющих на растительный покров, можно предсказать или предотвратить, используя тематические карты распределения вегетационных индексов.

Цель работы

Проанализировать состояние и динамику NDVI растительного покрова на примере лесопарка имени Лесоводов Башкирии путем сравнительной оценки космических снимков Landsat, полученных за 1988 г. и 2017 г.; провести оценку изменений вегетационного индекса в пределах лесотаксационных выделов и по категориям земель (лесные и нелесные).

Материалы и методика исследований

В работе были использованы два космических снимка Landsat, покрывающие территорию города Уфы. Первый снимок получен 24 августа 1988 г. (сцена LT51660221988237KIS00), второй снимок от 24 августа 2017 г. (сцена LC81660222017236LGN00). Снимки отбирались с облачностью менее 10 %. Пространственное разрешение – 30 м, картографическая проекция – UTM (зона 40, WGS-84).

Из-за низкого временного разрешения (в отличие от Sentinel-2) изображения Landsat необходимо предварительно обработать для последующего сравнительного анализа. Для этого используют спектральные методы смешивания, дробные методы, радиометрическую нормализацию и линейную регрессию изображений. Также применяются другие методы, такие как методы перекрестной калибровки, которые объединяют наборы нескольких типов данных (Stych et al., 2019).

В ходе исследования для обработки спутниковых снимков использован программный пакет со свободной лицензией SAGA 7.2.0 (System for Automated Geoscientific Analyses) (Conrad et al., 2015). Обработка снимка включала в себя радиометрическую калибровку красного (RED) и ближнего инфракрасного (NIR) спектральных каналов снимков. Для этого безразмерные нормализованные значения (Digital Number / DN) каждого пикселя пересчитывались в отражательную способность (reflectance) с помощью инструмента Top of Atmosphere Reflectance.

Построение индексного изображения NDVI осуществлялось с помощью инструмента Vegetation Index (Slope Based). На исследуемой территории карта NDVI представлена значениями от 0,25 до 0,8 (рис. 1). Для дальнейшего анализа эти значения были сгруппированы в 8 классов в соответствии с дискретной шкалой NDVI (табл. 1).

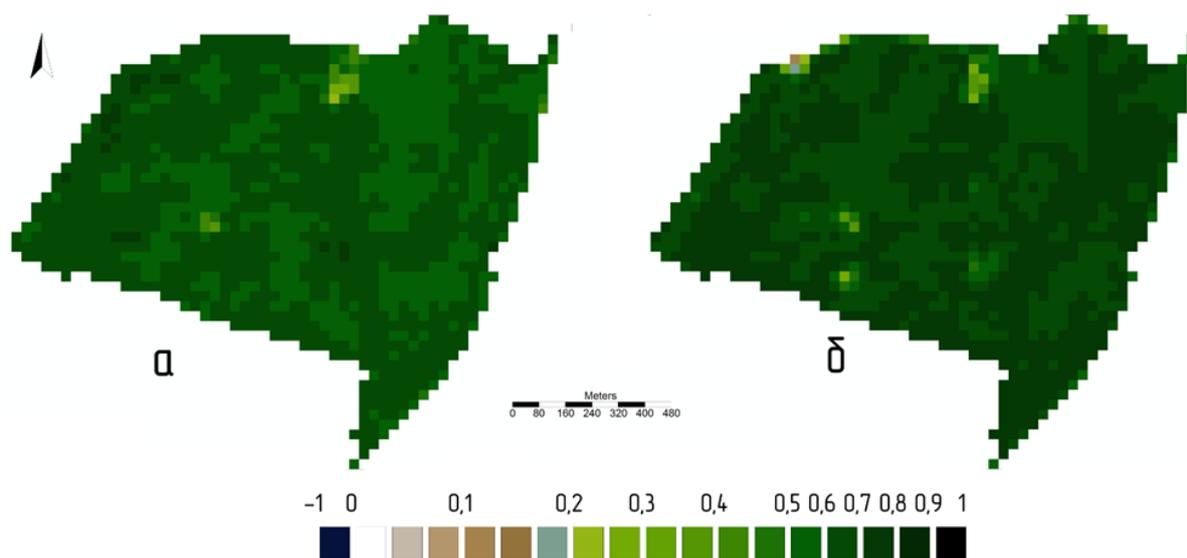


Рис. 1. Значения NDVI на территорию лесопарка им. Лесоводов Башкирии: а) за 1988; б) 2017 гг.

Наложение двух разновременных индексных изображений произвели с помощью инструмента Confusion Matrix (Two Grids). Полученную карту-схему, показывающую изменение

Пороговые значения NDVI для 8-ми классов

Значение NDVI		Class	Значение NDVI		Class
Min	Max		Min	Max	
0,25	0,3	1	0,45	0,5	5
0,3	0,35	2	0,5	0,6	6
0,35	0,4	3	0,6	0,7	7
0,4	0,45	4	0,7	0,8	8

классов за 29 лет наложили на тематическую лесную карту по преобладающим породам и категориям земель.

Результаты исследования и их обсуждение

Лесопарк имени Лесоводов Башкортостана – первый лесопарк в зеленой зоне города Уфы, созданный в 1966 г. на основе существующих лесных насаждений Паркового лесничества. Расположение в восточной части города с учетом розы ветров благоприятно сказывается на экологической обстановке благодаря созданию определенного буфера. В лесопарке преобладают древостои липы, а также 60-90-летние дубравы (рис. 2). Сосновые насаждения в лесопарке представлены лесными культурами, первые посадки которых относятся к 1937 г. Появившийся самосев лиственных пород, в особенности клена (*Acer platanoides* L.) и липы (*Tilia cordata* Mill.), лещины (*Corylus avellana*) и бересклета (*Euonymus europaeus* L.), под пологом сосняков формирует сложные по составу и ярусности насаждения. На территории лесопарка встречаются лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), вяз шершавый (*Ulmus glabra*), тополь бальзамический (*Populus balsamifera*), ольха черная (*Alnus glutinosa*), ольха серая (*Alnus incana*), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), осокорь (*Populus nigra*), ясень зеленый (*Fraxinus lanceolata*), яблоня (*Malus sylvestris*) (Уфимский..., 2019).

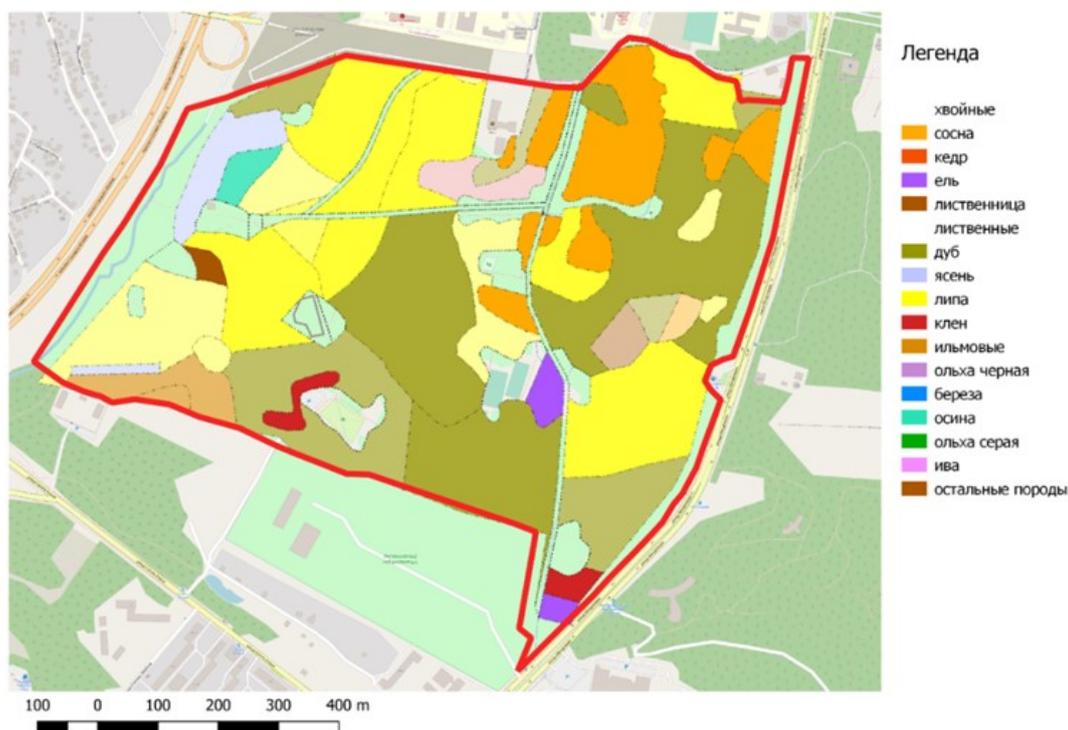


Рис. 2. Тематическая лесная карта лесопарка по преобладающим породам

Площадь лесопарка по категориям земель распределяется следующим образом (га): покрытая лесом площадь — 87,2, в том числе культуры — 24,3, редины — 0,4; вырубки — 0,4; водные поверхности — 0,2; дороги — 2,6; просеки — 0,9; хозяйственные постройки и сооружения — 2,4; болота — 0,6; поляны — 11,3 (Исяньюлова, 2015).

Сравнительный анализ таксационных показателей насаждения лесопарка, выполненный по материалам лесоустройства (1996-2014 гг.), выявил незначительные изменения полноты древостоя (от 0,60 до 0,62). Увеличение полноты произошло в большей степени по хвойному хозяйству с преобладанием сосны (*Pinus sylvestris* L.) и ели (*Picea abies*), это обусловлено тем, что за учетный период произошел перевод несомкнувшихся лесных культур в покрытую лесом площадь. Показатель продуктивности насаждения (бонитет) остался на прежнем уровне и составил 2,4, что характеризует насаждения как среднепроизводительные. Средний возраст насаждения в 2014 году составил 85 лет. Средний запас насаждения в 1996 г. составлял 185 м³/га, а в 2014 – 216 м³/га.

За 1996-2014 гг. из состава насаждения выпали такие древесные породы, как ольха серая (*Alnus incana*), береза (*Betula pendula* Roth), ива древовидная (*Salix alba*). Наблюдается снижение долевого участия в составе липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.), что обуславливается проведением лесохозяйственных мероприятий, связанных с рубками.

В 2014 году проводились различные мероприятия по благоустройству лесопарка им. Лесоводов Башкирии: санитарные выборочные рубки и уборка сухостоя и захламленности; вдоль дорожно-тропиночной сети и по периметру ландшафтных полей, проведена рубка неблагонадежного подроста и подлеска (поврежденные, отставшие в росте, зараженные вредителями), единичные посадки деревьев или пейзажных групп из саженцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели колючей (*Picea pungens*), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) в количестве 250-300 шт. на общей площади 0,7- 1,0 га (Уфимский..., 2019).

При группировке полученных значений NDVI в 8 классов согласно методике исследования, получили следующие результаты. На снимке 1988 г. большая часть территории лесопарка характеризуется седьмым (63,0 %), шестым (33,9 %) и восьмым (1,4 %) классами. Удельный вес остальных классов (1-5) составляет менее процента. На снимке Landsat 2017 г. наблюдается увеличение значения NDVI по площади растительного покрова: на 7 класс приходится 43,5 %; на 6 класс – 3 %, на 8 класс – 51,8 % (рис. 3).

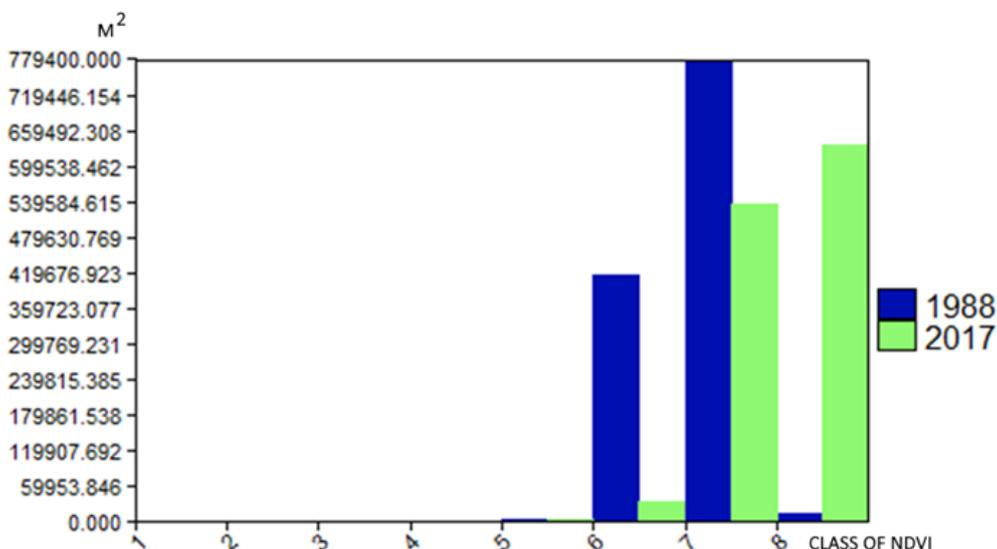


Рис. 3. Гистограмма динамики классов NDVI лесопарка им. Лесоводов Башкирии за 1988 и 2017 гг. по площади растительного покрова

Участки парка, на которых произошли изменения в 1-5 классах NDVI, незначительны. Существенными по площади являются изменения в 6-8 классах (табл. 2, рис. 4)

Таблица 2

Динамика классов NDVI с 1998 по 2017 г.

Изменения классов	Площадь, %						
1 >> 1	0,07	4 >> 1	0,07	6 >> 1	0,07	7 >> 3	0,07
1 >> 3	0,07	4 >> 3	0,15	6 >> 3	0,07	7 >> 5	0,29
1 >> 4	0,07	4 >> 6	0,22	6 >> 5	0,29	7 >> 6	1,17
3 >> 2	0,07	4 >> 7	0,07	6 >> 6	1,24	7 >> 7	19,24
3 >> 3	0,07	5 >> 5	0,15	6 >> 7	23,25	7 >> 8	41,98
3 >> 6	0,07	5 >> 6	0,29	6 >> 8	9,04	8 >> 7	0,58
3 >> 7	0,07	5 >> 7	0,29	7 >> 2	0,15	8 >> 8	0,80



Рис. 4. Карта-схема динамики распределения классов NDVI с 1998 по 2017 г.

Увеличение с 6 до 7 класса NDVI наблюдается на 23,3% территории лесопарка, на которых произрастают смешанные насаждения липы и дуба (7Лп3Д, р-0,6, М-250 м³/га, бонитет – 3, А-85 лет; 8Лп2Д, р-0,8, М-380 м³/га, бонитет – 3, А-85 лет) и культуры сосны (10С, р-0,9, М-410 м³/га, бонитет – 1А, А-82 года; 10С, р-0,9, М-400 м³/га, бонитет – 1А, А-75 лет).

Участки, на которых произошло увеличение с 6 до 8 класса NDVI, занимают 9,0 % территории лесопарка, они расположены локально, небольшими группами в липово-дубовых насаждениях (6Лп2Д2Кл+В, р-0,5, М-210 м³/га, бонитет – 3, А-85 лет).

Участки, на которых 7 класс NDVI остался без изменений, т.е. остался 7 классом, занимают 19,2 %. (6С3Лп1Я, р-1, М-290 м³/га, бонитет – 1А, А-52 года; 7С2Лп1Я, р-0,8, М-250 м³/га, бонитет – 1А, А-52 года).

Самыми большими по площади (42,0 %) являются участки, на которых произошло увеличение с 7 до 8 класса NDVI (3Д2Лп2Лп1В1Ил1Кл, р-0,5, М-160 м³/га, бонитет – 3, А-150 лет; 6Д4Лп+В+Кл+Лп, р-0,5, М-180 м³/га, бонитет – 3, А-110 лет; 3Лп2Д2Кл2Ил1Ос, р-0,6, М-180 м³/га, бонитет – 3, А-55 лет).

Участки лесопарка, на которых класс NDVI не изменился, составляют 21,6 %. Эти участки равномерно распределены по всему лесопарку. Большую часть лесопарка (65,5 %) составляют участки, на которых произошло увеличение площади NDVI на 1 класс. Они представлены как чистыми лесными культурами сосны, так и смешанными насаждениями липы, клена и дуба.

Уменьшение на 2 класса и более наблюдается на небольшой территории (менее 1 %). Это связано со строительством различных объектов (спортивная площадка, мангальная зона). С ними связаны участки, показывающее уменьшение NDVI на 1 класс (2,3 %), располагающиеся в переходной зоне от них к лесонасаждениям (рис. 5).

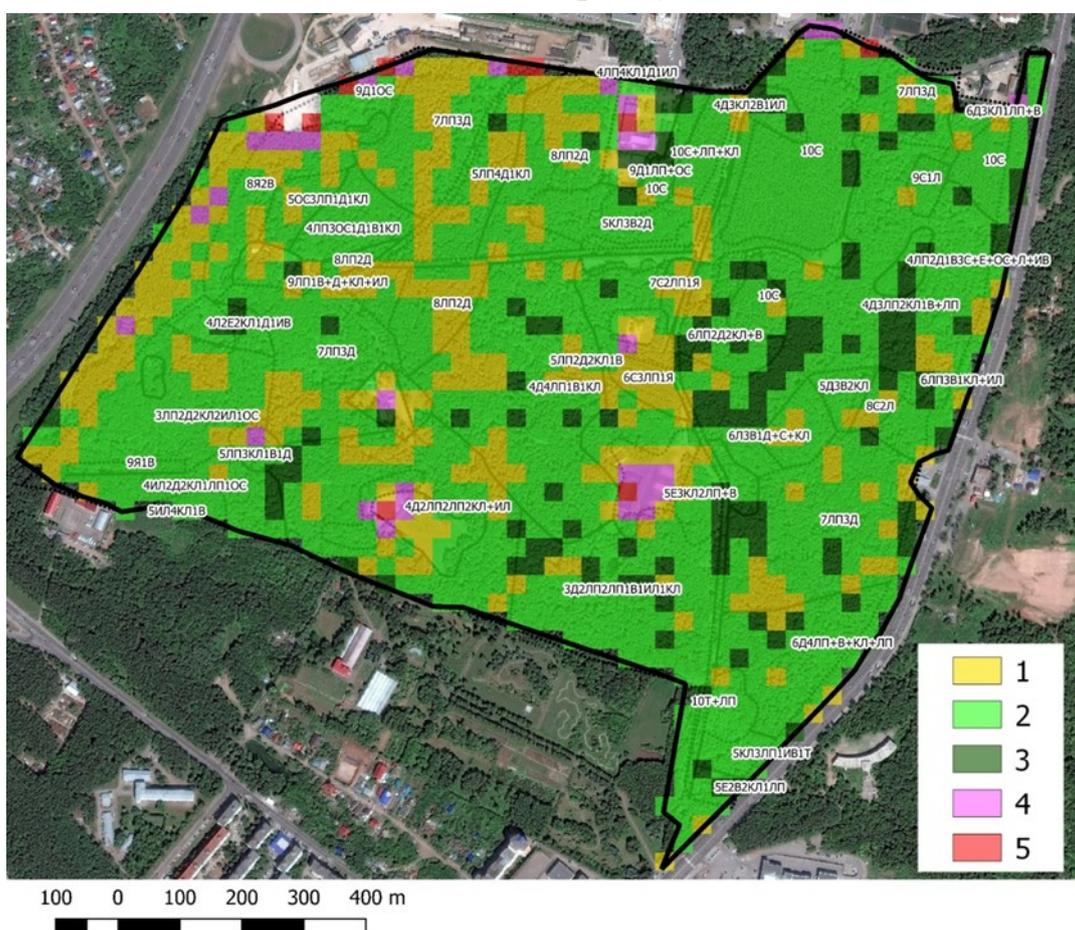


Рис. 5 Карта-схема изменений классов NDVI за 1988 и 2017 гг.:

1 – изменения в классах не произошли; 2 – повышение на 1 класс; 3 – повышение на 2 и более классов; 4 – понижение на 1 класс; 5 – понижение на 2 и более классов

Выводы

С 1988 г по 2017 год на лесопарк им. Лесоводов Башкирии значительно увеличились рекреационные и промышленные нагрузки. Только влияние транспортного потока повысилось за последние 5 лет на 30 %. В то же время применение лесоводственных мероприятий по повышению устойчивости древостоев ограничено вследствие расположения территории в лесопарковой части. Все это в целом теоретически должно было сказаться и на вегетационном индексе лесопарка в сторону его снижения.

Тем не менее, по данным ДЗЗ вегетационный индекс NDVI на исследуемой показал рост на основной части растительного покрова, в основном на 1 класс. Данное явление объясняется увеличением сомкнутости крон деревьев в насаждениях и возраста. Увеличение NDVI на 2 и более классов прослеживается преимущественно в лиственных насаждениях, сосновые насаждения за 29 лет в основном увеличились на 1 класс. Зависимости увеличения NDVI от возраста и породного состава выявлено не было. Уменьшение NDVI связано с работами по благоустройству лесопарка и строительством инфраструктурных объектов.

Библиографический список

1. Исяньюлова, Р.Р. Влияние мероприятий по реконструкции и благоустройству лесопарка им. Лесоводов Башкортостана г. Уфы на рекреационную емкость и экологическую продуктивность территории / Р.Р. Исяньюлова, Л.М. Ишбирдина, А.Ф. Мухтаруллина // Известия Оренбургского ГАУ. – 2015. – №5. – С. 167-172.
2. Курбанов, Э.А. Два десятилетия исследований растительного покрова по MODIS / Э.А. Курбанов // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – № 2. – С. 123-132.
3. Курбанов, Э.А. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2 / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Меньшиков, Л.Н. Смирнова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 5. – С. 154-166.
4. 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: ПГТУ, 2015. – 131 с.
5. 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.
6. Организация объединённых наций. – URL: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r.pdf> - 26.05.2019.
7. Рахматуллина, И.Р. Ландшафтно-экологическое картографирование водосборов малых рек в программе SA-GA GIS (на примере реки Усень Республики Башкортостан) / И.Р. Рахматуллина, З.З. Рахматуллин, Э.Р. Латыпов // Известия Уфимского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 75-78.
8. Рахматуллина, И.Р. Моделирование условий произрастания и анализ вклада факторов в формирование высокобонитетных насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в программе Maxent (на примере Бугульминско-Белебеевской возвышенности в пределах Республики Башкортостан) / И.Р. Рахматуллина, З.З. Рахматуллин, Э.Р. Латыпов // Природообустройство. – 2017. – № 3. – С.104 -111.
9. Уфимский лесотехнический техникум [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ulst.ru/parklesovodov/> - 26.05.2019.
10. Черепанов, А.С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина // Геоматика. – 2009. – №3. – С.28-32.
11. Adamczyk, J. Red-edge vegetation indices for detecting and assessing disturbances in Norway spruce dominated mountain forests / J. Adamczyk, A. Osberger // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2015. – Vol. 37. – P. 90-99.
12. Conrad, O. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4 [Electronic resource] / O. Conrad, B. Bechtel, M. Bock, H. Dietrich, E. Fischer, L. Gerlitz et al. // Geoscientific Model Development. 8, 1991-2007. – <http://www.geosci-model-dev.net/8/1991/2015/gmd-8-1991-2015.html>.
13. Jiao, Q. Detecting of forest afforestation and deforestation in Hainan Jianfengling Forest Park (China) using yearly Landsat time-series images / Q. Jiao, X. Zhang, Q. Sun // Remote Sensing Image Processing, Geographic Information Systems, and Other Applications. – 2017. – Vol. 10611.
14. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia / T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne // Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991; eds. G. Gutman, R. Volker. – Springer International Publishing. – 2017. – P. 173-192.
15. Naithani, S. Habitat suitability analysis for swamp deer (*Rucervus Duvaucelii*) using geo-spatial tools in Dudhwa national park / S. Naithani, P. Bedi, G. Areendran // American Journal of Remote Sensing. – 2018. – Vol. 6, №. 1. – P. 52-58.
16. Ren, Z. Spatiotemporal analyses of urban vegetation structural attributes using multitemporal Landsat TM data and field measurements / Z. Ren, R. Pu, H. Zheng, D. Zhang, X. He // Annals of Forest Science. – 2017. – Vol. 74: 54.
17. Stych, P. Evaluation of the influence of disturbances on forest vegetation using the time series of Landsat data: a comparison study of the Low Tatras and Sumava National Parks / P. Stych, J. Lastovicka, R. Hladky, D. Paluba // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2019. – Vol. 8, № 2. – P. 71.
18. Wen, M. The study of spatial and temporal change of vegetation cover in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan core region / M. Wen, J. Chen, D. Tang, Y. Ren, P. Luo, F. Wei // 2018 Fifth International workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA), IEEE. – 2018. – P. 1-5.

19. Yasmin, N. Dynamical assessment of vegetation trends over Margalla hills national park by using MODIS vegetation indices / N. Yasmin, M. F. Khokhar, S. Tanveer, Z. Saqib, W. R. Khan // *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. – 2016. – Vol. 53(4). – P. 777-786.

References

1. Isyan'yulova R.R., Ishbirdina L.M., Mukhtarullina A.F. Vliyanie meropriyatii po rekonstruktsii i blagoustroistvu lesoparka im. Lesovodov Bashkortostana g.Ufy na rekreatsionnyu emkost' i ekologicheskuyu produktivnost' territorii [The impact of measures for the reconstruction and improvement of the forest Park. Foresters of Bashkortostan Ufa on recreational capacity and ecological productivity of the territory], *Izvestiya Orenburgskogo GAU* [News of the Orenburg State Agrarian University], 2015, No. 5, pp.167-172.
2. Kurbanov E.A. Dva desyatiletia issledovaniy rastitel'nogo pokrova po MODIS [Two decades of vegetation cover studies by MODIS], *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring* [Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring]; *book of abstracts*, Ioshkar-Ola: PGTU, 2016, No. 2, pp. 123-132.
3. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Men'shikov S.A., Smirnova L.N. Raspoznavanie lesnykh nasazhdenii i dominiruyushchikh drevesnykh porod Penzenskoi obla-sti po dannym sputnika Sentinel-2 [Recognition of forest plantations and dominant tree species of the Penza region according to the Sentinel-2 satellite], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 154-166.
4. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Lezhnin S.A., Gubaev A.V., Polevshchikova Yu.A. Tematicheskoe kartirovanie rastitel'nogo pokrova po sputnikovym snimkam: validatsiya i otsenka tochnosti [Thematic mapping of vegetation cover from satellite images: validation and accuracy assessment]; monografiya, Ioshkar-Ola: PGTU, 2015, 131 p.
5. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N. Chetyre desyatiletia issledovaniy lesov po snimkam Landsat [Landsat's four decades of forest research], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature management], 2014, No. 1(21), pp. 18-32.
6. Organizatsiya ob"edinennykh natsii [United Nations], URL: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r.pdf>, 26.05.2019.
7. Rakhmatullina I.R., Rakhmatullin Z.Z., Latypov E.R. Landshaftno-ekologicheskoe kartografirovaniye vodosborov malykh rek v programme SAGA GIS (na primere reki Usen' Respubliki Bashkortostan) [Landscape and ecological mapping of catchments of small rivers in the SAGA GIS program (on the example of the Usen river of the Republic of Bashkortostan)], *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Bulletin of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, No. 4(1), pp.75-78.
8. Rakhmatullina I.R., Rakhmatullin Z.Z., Latypov E.R. Modelirovaniye uslovii proizrastaniya i analiz vklada faktorov v formirovaniye vysokobonitetnykh nasazhdenii sosny obyknovЕННОI (Pinus sylvestris L.) v programme Maxent (na primere Bugul'minsko-Belebeyevskoi vozvysheNNosti v predelakh Respubliki Bashkortostan) [Modeling of growing conditions and analysis of the contribution of factors to the formation of high-density stands of pine (Pinus sylvestris L.) in the Maxent program (on the example of Bugulminsko-Belebeyevskaya upland within the Republic of Bashkortostan)], *Prirodoobustroistvo* [Environmental management], 2017, No. 3, pp.104 -111.
9. Ufimskii lesotekhnicheskii tekhnikum [The Ufa forestry College], URL:<http://www.ulit.ru/parklesovodov>, 26.05.2019.
10. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spektral'nye svoystva rastitel'nosti i vegetatsionnye indeksy [Spectral properties of vegetation and vegetation indices], *Geomatika*, 2009, No. 3, pp.28-32.
11. Adamczyk J., Osberger A. Red-edge vegetation indices for detecting and assessing disturbances in Norway spruce dominated mountain forests, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, Vol. 37, pp. 90-99.
12. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 [Electronic resource], *Geoscientific Model Development*, 8, 1991-2007, URL: <http://www.geosci-model-dev.net/8/1991/2015/gmd-8-1991-2015.html>.
13. Jiao Q., Zhang X., Sun Q. Detecting of forest afforestation and deforestation in Hainan Jianfengling Forest Park (China) using yearly Landsat time-series images, *Remote Sensing Image Processing, Geographic Information Systems, and Other Applications*, 2017, Vol. 10611, MIPPR 2017.
14. Loboda T., Krankina O., Savin I., Kurbanov E., Joanne H. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Eco-logical Systems of European Russia, *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*; eds. G. Gutman, R. Volker, Springer International Publishing, 2017, pp. 173—192.
15. Naithani S. Habitat Suitability Analysis for Swamp Deer (Rucervus Duvaucelii) Using Geo-Spatial Tools in Dudhwa National Park, Suneet Naithani, Prachee Bedi, Gopala Areendran, *American Journal of Remote Sensing*, 2018, Vol. 6, No. 1, pp. 52-58.
16. Ren Z., Pu R., Zheng H., Zhang D., He X. Spatiotemporal analyses of urban vegetation structural attributes using multitemporal Landsat TM data and field measurements, *Annals of Forest Science*, 2017, 74:54, DOI 10.1007/s13595-017-0654-x
17. Stych P., Lastovicka J., Hladky R., Paluba D. Evaluation of the Influence of Disturbances on Forest Vegetation Using the Time Series of Landsat Data: A Comparison Study of the Low Tatras and Sumava National Parks, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8, 71, DOI:10.3390/ijgi8020071

18. Wen M., Chen J., Tang D., Ren Y., Luo P., Wei F. The Study of Spatial and Temporal Change of Vegetation Cover in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Core Region, *Proc. 2018 Fifth International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA)*, Xi'an, 2018, pp. 1-5.
19. Yasmin N., Fahim Khokhar M., Tanveer S., Saqib Z., Razzaq Khan W. Dynamical assessment of vegetation trends over Margalla hills national park by using MODIS vegetation indices, *Pakistan Journal of Agri-cultural Sciences*, 2016, Vol. 53(4), pp. 777-786.

СПЕКТРАЛЬНАЯ РАЗДЕЛИМОСТЬ КЛАССОВ НАЗЕМНОГО ПОКРОВА МУХАФАЗА ЛАТАКИЯ СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SENTINEL-2

М. С. Али

Поволжский государственный технологический университет

Дистанционный мониторинг является важным элементом при оценке влияния климатических и антропогенных факторов на состояния растительного покрова Земли, особенно в труднодоступных регионах. При этом необходимо иметь полную информацию о подстилающей поверхности исследуемой территории, включая породный состав произрастающей на ней растительности. Все это актуально для современной Сирийской Арабской Республики, большая часть растительного покрова которой размещается в горных труднодоступных районах. С запуском миссии Sentinel-2 Европейского космического агентства появились новые возможности для своевременного картографирования различных пород деревьев благодаря пространственному, спектральному и временному разрешению сенсоров этого спутника. Целью исследования было провести и оценить спектральную разделимость классов наземного покрова, большинство из которых представлены лесными насаждениями, мухафаза Латакия Сирийской Арабской Республики с использованием спутникового снимка Sentinel-2 и экспериментальных данных полевых исследований. С помощью этих данных была разработана легенда для 13 классов наземного покрова на основе рекомендаций международной организации ФАО по классификации глобального покрова Земли. Спектральная разделимость классов наземного покрова, подробно описанных в разработанной легенде, проводилась по методике Джеффрис-Матусита (мера попарного межкластерного расстояния). Результаты сравнительного анализа полученных результатов показали статистически значимую спектральную разделимость (больше 1,4) для всех 13 классов наземного (растительного) покрова исследуемой провинции. Полученная легенда классов и результаты их спектральной разделимости будут использованы для последующей тематической классификации и картографирования растительного покрова мухафаза Латакия и других районов Сирийской Арабской Республики, имеющих растительный покров.

Ключевые слова: Sentinel-2, растительный покров, Сирийская Арабская Республика, тематическое картографирование, спектральная разделимость, методика Джеффрис-Матусита.

SPECTRAL SEPARABILITY OF LAND COVER CLASSES OF LATAKIA PROVINCE OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC WITH THE USE OF SENTINEL-2

M. S. Ali

Volga State University of Technology

Remote sensing is an important element in assessing the impact of climatic and anthropogenic factors on the state of the Earth's vegetation cover, especially in hard-to-reach regions. In this case, it is necessary to have complete information about the underlying surface of the study area, including the species composition of vegetation growing on it. All this is relevant for the modern Syrian Arab Republic, most of the vegetation of which grows in mountainous inaccessible areas. With the launch of the Sentinel-2 mission of the European Space Agency, new opportunities have appeared for the timely mapping of various tree species due to the spatial, spectral and temporal resolutions of the satellite sensors. The aim of the study was to carry out and evaluate the spectral separability of land cover classes, most of which are represented by forest stands in Latakia province of the Syrian Arab Republic using the Sentinel-2 satellite images and experimental field data. Based on these data, a legend was developed for 13 classes of land cover based on the recommendations of the international organization FAO for the classification of the global Earth cover. The spectral separability of the land cover classes described in detail in the developed legend was car-

ried out according to the Jeffries-Matusita method (a measure inter-cluster distance). The results of a comparative analysis showed a statistically significant spectral separability (greater than 1.4) for all 13 classes of land (vegetation) cover of the area under study. The legend of the classes and the results of their spectral separability will be used for subsequent thematic classification and mapping of the vegetation cover of Latakia province and other areas of the Syrian Arab Republic with the vegetation cover.

Key words: Sentinel-2, vegetation cover, Syrian Arab Republic, thematic mapping, spectral separability, Jeffries-Matusita Technique.

Введение. Тематическое картографирование лесных территорий по спутниковым данным имеет важное практическое значение при ведении лесного хозяйства, мониторинге состояния лесов, оценке биоразнообразия экосистем, а также исследованиях углеродного цикла на региональном и глобальном уровнях (Loboda et al., 2017; Воробьев, Курбанов, 2017). Для этих целей широкое применение находят различные спутниковые системы, изображения которых можно найти в открытом доступе на сайтах ведущих организаций в этой области (USGS, JRC, Copernicus, Роскосмос и др.).

В последние годы стали активно использоваться разновременные спутниковые снимки, которые позволяют выявлять изменения в растительном покрове на больших площадях с течением времени (Herinstall-Сymerman et al., 2009; Елсаков, Кулюгина, 2014; Helman et al., 2015; Воробьев и др., 2019). Такие подходы особенно применимы при использовании разновременных изображений спутниковой системы Landsat, архивные данные которой можно найти, начиная с 1970-х годов (Барталев и др., 2012; Курбанов и др., 2014; Gomariz-Castillo et al, 2017) или сенсоров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua (Cai et al., 2014; Курбанов, 2016).

В 2010-х годах стали активно применяться изображения спутниковой системы Sentinel Европейского космического агентства (Meyer et al., 2019; Grabska et al., 2019;). Спутниковые снимки Sentinel-2 высокого разрешения позволяют дешифровать и выделять на тематических картах типы лесов и их породный состав (Immitzer et al, 2016; Puletti et al., 2018; Курбанов и др., 2018, Persson et al., 2019). Среди научных исследований с использованием спутниковых изображений Sentinel-2 стоит также отметить проведение мониторинга растительного покрова саванн Северной Америки (Hill, 2013), оценку содержания хлорофилла в лесном покрове (Frampton et al, 2013; Zarco-Tejada et al., 2019), классификацию альпийской тундровой растительности в Чехии (Kurkova et al., 2017) и наземного покрова в Румынском Закарпатье (Rujoiu-Mare et al., 2017).

Большой интерес при тематической классификации представляет текстурный рисунок полога лесного насаждения, полученный по снимкам Landsat и Sentinel, на примере тропических лесов (Culter et al., 2012; Lu et al., 2014). Оценка текстуры полога, которая характеризует точечную пространственную связь между изучаемым центральным и соседними пикселями изображения ДЗЗ, позволяет усилить дифференциацию типов растительного покрова и определить границы исследуемых признаков (Laurin et al., 2016; Astola et al., 2019; Воробьев и др., 2019а). Данные Sentinel-2 также широко используются для решения задач дистанционного мониторинга растительности (лесов), сельскохозяйственных полей, а также при управлении чрезвычайными ситуациями.

Еще одним важным направлением в обработке данных ДЗЗ является автоматизация процесса картографирования с комбинированием снимков для временных рядов разного пространственного разрешения. Для территории Франции была апробирована методика автоматической управляемой классификации для 17 классов наземного покрова на основе существующих баз данных и свободно доступных изображений ДЗЗ, используемых для обучения и оценки точности картографирования (Inglada et al., 2017). Для автоматического картогра-

фирования иранского региона Голестан была использована комбинированная методика, объединяющая управляемую и неуправляемую классификацию с принятием решений на основе доступных эмпирических данных и снимков Landsat (Mohammady et al., 2015). Полученная тематическая карта для 6 классов наземного покрова показала высокую степень точности с коэффициентом Каппа до 98 %. Полученные результаты подтверждают эффективность таких методик (технологий), позволяющих обеспечивать специалистов оперативно обновляемыми тематическими картами без дорогостоящих полевых исследований для калибровки и проверки используемых моделей (Барталев и др., 2016; Курбанов и др., 2016; Leinenkugel et al., 2019).

Цель работы – провести оценку спектральной разделимости классов растительного (лесного) покрова мухафаз Латакия Сирийской Арабской Республики (САР) по данным спутниковой съемки Sentinel-2.

Для достижения данной цели были решены следующие **задачи**:

- подобран спутниковый снимок Sentinel-2 на территорию исследования;
- разработана легенда классов лесного покрова на мухафаз Латакия;
- проведена оценка спектральной разделимости подобранных классов растительного покрова с помощью методики «Джеффрис-Матусита».

Материалы и методы

Объект и область исследования

Объектом исследований явились лесные насаждения на территории мухафаз (провинции) Латакия САР (рис. 1), расположенной на восточном побережье Средиземного моря (Воробьев и др., 2019а). В районе исследования преобладает средиземноморский климат, который характеризуется засушливым летом и мягкой, дождливой зимой. Среднее количество осадков составляет около 765 мм в год. Лесные насаждения расположены в основном в прибрежной зоне (Воробьев, Али, 2018).

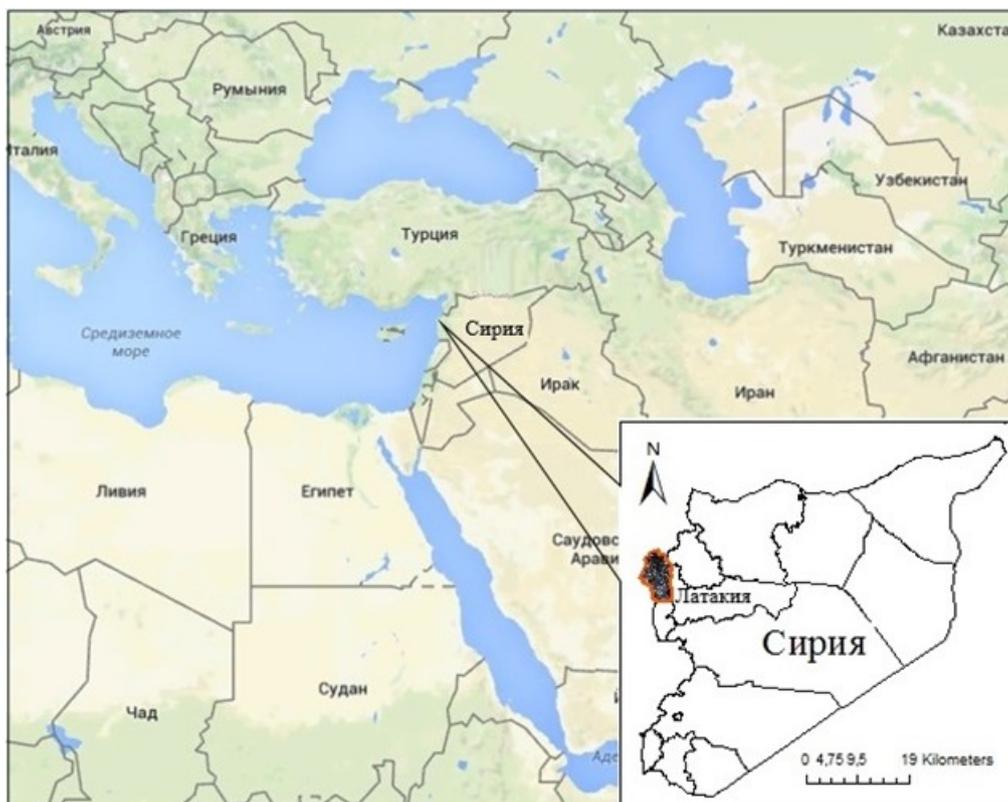


Рис. 1. Мухафаз Латакия на карте САР (Ресурс - Yandex Карта)

В САР площадь лесов оценивается в 240650 га. Леса провинции Латакия составляют 37 % этой площади, что эквивалентно 85000 га. Большие площади высокополнотных лесов в мухафазе Латакия расположены в горных районах с крутыми склонами (Lattakia agriculture ..., 2018). Сам лесной покров провинции можно разделить на несколько типов в зависимости от географического положения: высоты над уровнем моря, удаленности от прибрежной зоны, степени влияния воздушных масс и осадков (Хуссейн и др. 2016). Лесные насаждения САР, произрастающие на горных массивах, распределяются на два типа:

1) Лесные земли на западной части предгорных и горных районов Латакии. Их выделяют по границам высотных ярусов:

- высоты до 200-300 м над уровнем моря. На этой площади расположены небольшие участки местности, которые занимают леса с преобладанием рожкового дерева (*Siliqua ceratonia*) и зарослей фисташки (*Lentiscus pistacia*). На этих участках лесные земли в основном используются под сельскохозяйственные нужды;
- высоты от 300 до 750 м. Этот уровень занимают насаждения с преобладанием дуба кустарникового (*Queues calliprinos*) и фисташки палестинской (*Pistacia Palaestina*);
- высоты от 750 до 850 м представлены дубом заражённым (*Quercus infectoria*). На этом уровне почти не осталось леса, за исключением отдельных участков, разбросанных между сельхозугодиями и садами;
- высоты от 850 до 1200 м заняты насаждениями дуба австрийского (*Quercus cerris*);
- на высотах от 1200 до 1570 м встречается пихта киликийская (*Abies cilicica*).

2) Восточные склоны горных массивов представлены участками лесных массивов:

- на высотах от 300 до 900 м над уровнем моря с преобладанием дуба кустарникового (*Queues calliprinos*) и фисташки палестинской (*Pistacia palaestina*). Начиная с 900 до 1100 м встречаются древостои, представленные дубом австрийским (*Quercus cerris*);
- на высотах от 1100 до 1570 на жестких известняковых скалах произрастают насаждения с преобладанием кедра ливанского (*Cedrus Libani*), а также представленные грабом восточным (*Carpinus orientalis*), дубом ливанским (*Quercus libani*), ясенем манновым (*Fraxinus ornus*), дубом скальным (*Quercus cedrorum*) и др.

На территорию исследования был получен спутниковый снимок Sentinel-2B (S2B_MSI_L1C_20170903T081959_N0205_R121_T36SYE) от 03.09.2017. Изображение с уровнем обработки 1C (Level-1C product) было получено с геопортала Европейской программы «Коперникус» (Copernicus scientific ...). Вся работа с полученным изображением велась в программных комплексах ENVI, ArcGis 10.3, QGIS 3.1. Снимок прошел радиометрическую и атмосферную коррекцию с использованием модуля «Полуавтоматический плагин классификации» (Semi-automatic classification plugin) QGIS 3.1, что позволило снизить влияние атмосферных помех на используемое изображение.

Полевые исследования

Полевые натурные работы на территории исследования были проведены в 2018 году. Во время полевых исследований были заложены тестовые участки (ТУ), репрезентативно представляющие все классы наземного покрова провинции Латакия. Подбор тестовых участков осуществлялся для последующей валидации и оценки точности разрабатываемого картографического материала лесного покрова района Латакия. В качестве вспомогательного материала для полевых работ использовались материалы спутниковой съемки высокого разрешения (другие снимки Sentinel-2), лесные тематические карты, данные министерства сельского хозяйства и аграрной реформы САР, а также информация из открытых интернет-ресурсов (Yandex, Google, DigitalGlobe).

Основные виды работ проводились на лесных участках с наличием древесно-кустарниковой растительности различного породного состава. Главным условием при подбо-

ре тестовых участков была их репрезентативная представленность во всех классах наземного покрова и равномерное распределение по территории исследования. Для идентификации на снимке Sentinel-2 площадь тестовых участков на местности составляла не менее 0,5 га. В результате полевых работ было заложено 173 ТУ на разных высотных уровнях и на побережье Средиземного моря. Кроме того, были заложены 150 ТУ на нелесных участках для их точной идентификации, необходимой при проведении классификации изображений с высокой точностью картографирования (рис. 2).

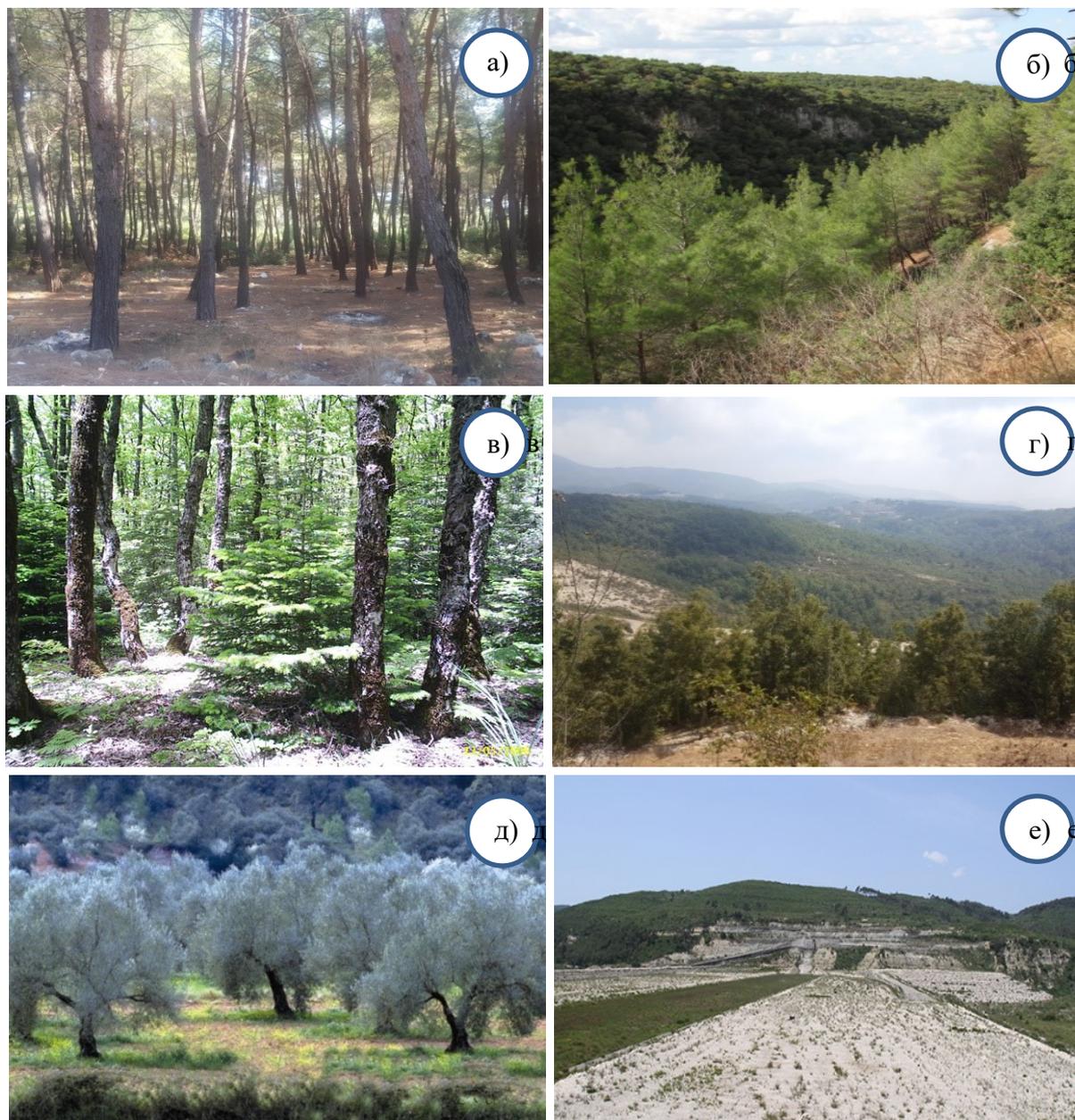


Рис. 2. Примеры тестовых участков: а) сосна калабрийская (*Pinus brutia*); б) древесно-кустарниковая растительность (с преобладанием *Pinus brutia*); в) дуб кустарниковый кермесовый (*Quercus calliprinus*); г) дуб австрийский (*Quercus cerris*); д) фруктовые деревья (оливковые сады); е) открытые участки (Без растительности)

На основе заложенных тестовых участков были выделены доминирующие классы растительного покрова согласно общепринятой международной системе классификации наземного покрова LULC ФАО (Land Cover ...). Легенда для классификации сцены Sentinel-2 (табл. 1) также была сформирована с учетом рекомендаций ФАО (Legend of the global ...) по созданию глобальных карт наземного покрова.

Легенда тематической карты наземного покрова провинции Латакия САР

Наименование класса	Код класса	Описание
Пихта киликийская	ПК	Основной ярус представлен древостоем хвойных пород, более 7 единиц в составе насаждения, высотой более 2 м и сомкнутостью полога более 60 %. Преобладающая порода – пихта киликийская.
Сосна калабрийская	СК	Основной ярус представлен древостоем хвойных вечнозеленых пород, более 7 единиц в составе насаждения, высотой более 3 м и сомкнутостью полога более 70 %. Преобладающая порода – сосна калабрийская.
Дуб австрийский	ДА	Основной ярус представлен сомкнутым древостоем широколиственных пород деревьев высотой более 3 м и сомкнутостью полога более 70 %. Более 7 единиц в составе насаждения. Преобладающая порода – дуб австрийский.
Дуб кустарниковый кермесовый	ДК	Основной ярус представлен древостоем лиственных пород высотой более 2 м и сомкнутостью полога более 65 %. Преобладающая порода – дуб кустарниковый составляет более 70 % от состава насаждения.
Древесно-кустарниковая растительность	ДКР	Класс представлен низкорастущими деревьями высотой до 3 м: <i>Pinus brutia</i> , <i>Quercus calliprinos</i> , <i>Ceratonia siliqua</i> , <i>Arbutus andrachne</i> , <i>Rhus cotinus</i> и др. Преобладающая порода – <i>Pinus brutia</i> составляет более 50 % от состава насаждения.
Травянистый сомкнутый	ТС	Основной ярус представлен сомкнутой многолетней травянистой растительностью, с проактивным покрытием более 65 %.
Цитрусовые	Ц	Основной ярус представлен цитрусовыми деревьями высотой более 1,5 м и сомкнутостью полога 60-80 %.
Фруктовые деревья	ФД	Основной вид деревьев представлен оливковыми насаждениями высотой более 2 м и сомкнутостью полога 30-60 %. Земли используются также под посадку других видов фруктовых деревьев.
Сельскохозяйственные земли	СЗ	Сезонный максимум сельскохозяйственных соответствует 60-100 % занимаемой площади. Земли в основном используются под выращивание злаковых и овощных культур.
Без растительности (открытые участки)	ОУ	Участки без растительного покрова или с покровом менее 10 % в течение 10 и более месяцев в году (песчаные карьеры, суглинистые почвы).
Населенные пункты (города, поселки)	НП	Класс представлен искусственными объектами, где площадь зданий и сооружений составляет более 40 %; включает смешанный древесный растительный покров с высотой деревьев выше 3 м и сомкнутостью полога менее 10 %.
Водный объект	В	Класс представлен водоемами с наличием воды более 11 месяцев в году.
Облака	О	Класс представлен облачным покровом и тенями от облаков.

Спектральная делимость

Анализ спектральной делимости классов наземного покрова проводился на основе тестовых участков, заложенных во время полевых исследований. Эти данные позволяют оценить морфологические особенности исследуемой растительности, а также выявить структурные и физические характеристики объектов, не попадающих в класс лесная растительность. Для проведения классификации фрагмента сцены спутника Sentinel-2B была подготовлена обучающая выборка в виде ROI (Region of interest), сформированная на основе данных тестовых участков и экспертного анализа данных. Точность тематической классификации в значительной степени определяется уровнем спектральной делимости созданной ROI.

Обычно спектральная делимость объектов местности с высокой фрагментацией или сложным рельефом на изображениях ДЗЗ с низким или средним разрешением является не-

простой задачей. Поэтому до проведения процедуры классификации спутникового снимка используемые тестовые участки и ROI были проанализированы на спектральную разделимость с использованием методики Джеффрис-Матусита (JM) (мера межкластерного расстояния), которая вычисляется путем сравнения каждой пары тестовых участков (Huang et al., 2016; Kurbanov et al., 2019). Значения статистической разделимости выбранных ROI могут варьировать от 0 до 2, а значение индекса выше 1,41 свидетельствует о хорошей спектральной разделимости исследуемых классов наземного покрова (Chuviesco, 2016).

Результаты исследования и их обсуждение

Точность классификации в значительной степени определяется уровнем спектральной разделимости ROI. Результат этого анализа разделимости представлен в таблице 2.

Таблица 2

Разделимость классов наземного покрова провинции Латакия по методике Джеффрис-Матусита

	ПК	СК	ДА	ДК	ДКР	ТС	Ц	СЗ	ФД	ОУ	НП	В	О
ПК		1,79	1,94	1,87	1,94	1,99	1,99	1,99	1,99	2,00	1,99	2,00	2,00
СК			1,72	1,68	1,66	1,98	1,82	1,98	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
ДА				1,66	1,72	1,87	1,94	1,99	1,76	1,99	1,97	2,00	1,99
ДК					1,57	1,87	1,64	2,00	1,99	2,00	2,00	2,00	2,00
ДКР						1,77	1,65	1,85	1,87	1,99	1,88	1,98	2,00
ТС							1,81	1,65	1,88	1,96	2,00	1,86	1,99
Ц								1,90	1,99	1,99	2,00	1,99	2,00
СЗ									1,72	1,93	1,90	1,99	2,00
ФД										1,99	1,78	2,00	2,00
ОУ											1,91	2,00	2,00
НП												2,00	2,00
В													2,00
О													

Попарный анализ по методике JM свидетельствует о высокой разделимости для большинства рассматриваемых классов, значения статистической разделимости для которых составляют выше 1,4. Значения расстояния JM между 1,4-1,8 для классов ДК - ДА, ДК - ДКР, ДКР - Ц, ДК - Ц показывают сложность выявления различий между ними, несмотря на использование оптимально подобранных классификационных признаков (пороговый анализ спектральных значений, текстурные показатели и т.п.). Диаграмма рассеяния для 6 классов растительного покрова в пространстве спектральных значений показана на рисунке 3.

Как видно на рисунках 3 и 4, в некоторых случаях границы перехода одного класса в другой достаточно условны. Для близких по породному составу классов ДК и ДА наблюдается относительное смешивание, что связано со схожестью в вегетации и спектральных характеристиках. Тем не менее, эти классы растительного покрова могут отличаться по форме крон, пространственному распределению, текстуре рисунка полого. Иначе говоря, несмотря на близость спектральных значений для оцениваемых классов древесно-растительного покрова,

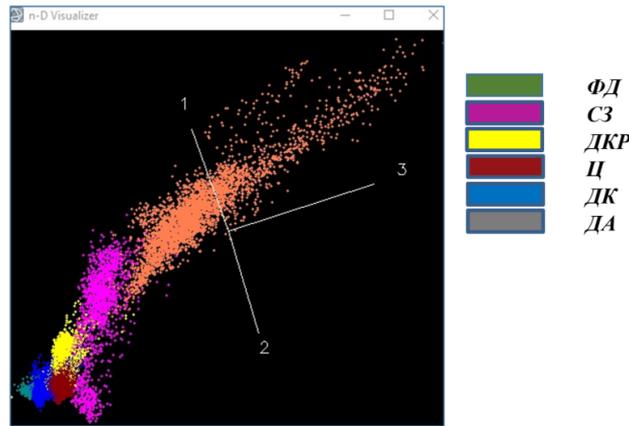


Рис. 3. Диаграмма рассеяния спектральных значений 6 классов растительного покрова провинции Латакия SAR

они имеют свои индивидуальные особенности. Это позволяет выделить их при сравнительном статистическом анализе спектральных данных.

По рисунку 4 видно, что на снимке Sentinel-2В классы наземного покрова, обладающие большей полнотой растительного полога (особенно в красной (b3), зеленой (b2) и синей (b1) зонах электромагнитного спектра), имеют близкие спектральные значения (кривые). Тем не менее, даже визуально (графически) наблюдается четкое различие между всеми классами наземного покрова провинции Латакия, значение JM для которых в большинстве случаев приближается к 2.

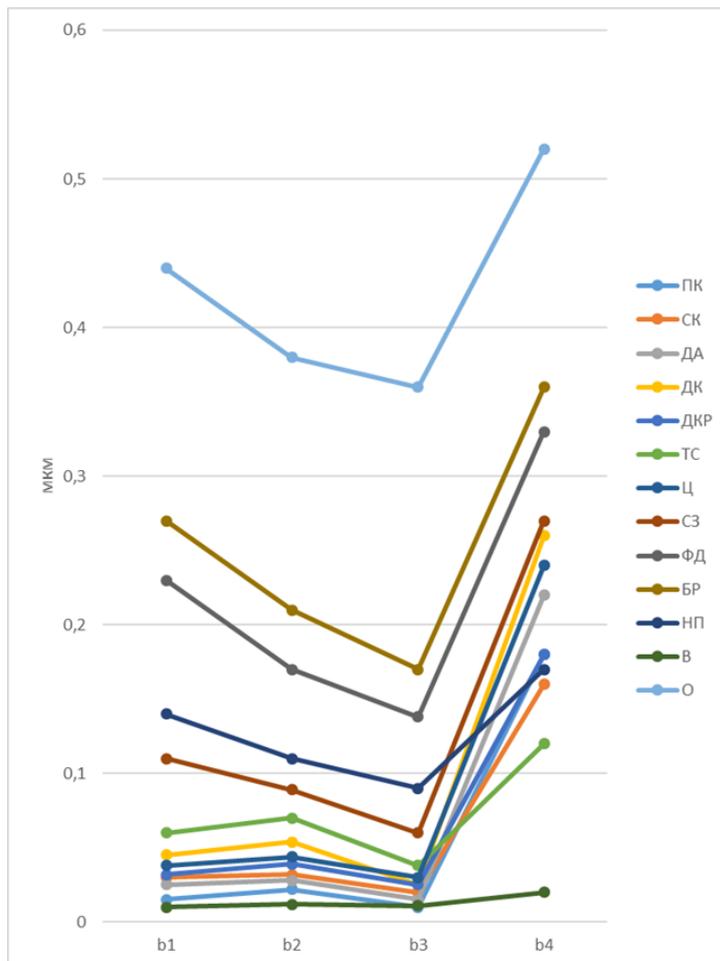


Рис. 4. Кривые спектральной яркости для 13 оцениваемых классов наземного покрова территории исследования по спектральным каналам

Заключение

Возможность удаленного картографирования растительного покрова лесных экосистем, включая произрастающих на горных участках, позволяет осуществлять оценку и мониторинг их состояния, который сложно проводить в полевых условиях. Все это особенно актуально для современной Сирийской Арабской Республики. На сегодняшний день для картографирования растительного покрова широко используют спутник Sentinel-2 Европейского космического агентства, пространственное разрешение которого (10 м) позволяет дешифровать породный состав исследуемых лесных насаждений.

В работе проведены подбор одного снимка Sentinel-2В на территорию провинции Латакия САР, его предварительная обработка и подготовка к тематической классификации. На основе результатов полевых работ и других эмпирических данных были выделены 13 классов наземного покрова на исследуемой территории. Предварительная оценка на спектральную разделимость всех подобранных классов по методике межкластерного расстояния Джеффрис-Матусита между их парами показала приемлемые результаты, статистически подтвержденные значениями JV выше порогового значения 1,4. Все это свидетельствует о том, что полученный набор обучающей выборки в виде ROI классов наземного покрова может быть успешно использован для проведения дальнейшей процедуры классификации изображения Sentinel-2В.

Библиографический список

1. Барталев, С.А. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.Ю. Ефремов, Е.А. Лупян, Ф.В. Стыценко, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т.9, № 2. – С. 9-26.
2. Барталев, С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков, Н.В. Шабанов. – Москва: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.
3. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на горях Марийского лесного Заволжья / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – № 2 (14). – С. 124-134.
4. Воробьев, О.Н. 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. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019. – 200 с.
5. Воробьев, О.Н. Классификация лесного покрова мухафаза Латакия Сирийской Арабской Республики по данным спутника Sentinel-2 [Электронный ресурс] / О.Н. Воробьев, М.С. Али // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей / Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – № 4. – С. 110-122. – URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>
6. 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.
7. Курбанов, Э.А. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2 / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Меньшиков, Л.Н. Смирнова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 5. – С. 154-166.
8. Курбанов Э.А. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 36-48.
9. 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.
10. Курбанов, Э.А. Два десятилетия исследований растительного покрова по MODIS // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей [Электронный ресурс] / Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – № 2. – С. 123-132. – URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/Forest%20ecosystem%20under%20climate%20change%202016.pdf>
11. Хуссейн, А. Национальный доклад о биологическом разнообразии генетических ресурсов для производства продовольствия и ведения сельского хозяйства в Сирийской Арабской Республике / А. Хуссейн, Д. Моваффах, В. Юсеф. – Дамаск, 2016. – 212 с.

12. Astola, H. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region / H. Astola, T. Häme, L. Sirro, M. Molinier, J. Kilpi // *Remote Sensing of Environment*. – 2019. – Vol. 223. – P. 257-273
13. Cai, S. Enhancing MODIS land cover product with a spatial-temporal modeling algorithm / S. Cai, D. Liu, D. Sulla-Menashe, M.A. Friedl // *Remote Sensing of Environment*. – 2014. – Vol. 147. – P. 243-255.
14. Chuvieco, E. Fundamentals of satellite remote sensing: an environmental approach. Second Edition / E. Chuvieco // New York: CRC Press Taylor & Francis. – 2016. – 468 p.
15. Copernicus scientific data hub [Electronic resource]. – URL: <https://scihub.copernicus.eu/>
16. Cutler, M.E.J. Estimating tropical forest biomass with a combination of SAR image texture and Landsat TM data: An Assessment of Predictions Between Regions / M.E.J. Cutler, D.S. Boyd, G.M. Foody, A. Vetrivel // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 70, ID 042032. – P. 66-77.
17. Frampton, W.J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation / W.J. Frampton, J. Dash, G. Watmough, E.J. Milton // *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. – 2013. – Vol. 82. – P. 83-92.
18. Gomariz-Castillo, F. Improving classification accuracy of multi-temporal Landsat images by assessing the use of different algorithms, textural and ancillary information for a Mediterranean semiarid area from 2000 to 2015/ F. Gomariz-Castillo, F. Alonso-Sarria, F. Cánovas-García // *Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 9(10): 1058. – P. 1-23.
19. Grabska, E. Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series / E. Grabska, P. Hostert, D. Pflugmacher, K. Ostapowicz // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, No. 10: 1197. – P. 1-24.
20. Helman, D.A. A phenology-based method for monitoring woody and herbaceous vegetation in Mediterranean forests from NDVI time series / D. Helman, I.M. Lensky, N. Tessler, Y. Osem // *Remote Sensing*. – 2015. – Vol. 7, No. 9, 12314-12335.
21. 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. – No. 1. – P. 1353-1379.
22. Hill, M.J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated Sentinel 2 data for a North American transect / M.J. Hill // *Remote sensing of environment*. – 2013. – Vol. 137. – P. 94-111.
23. Huang H. Separability analysis of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) data for burned area discrimination / H. Huang, D.P. Roy, L. Boschetti, H.K. Zhang, L. Yan, S.S. Kumar et al. // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8, No. 10. – P. 873.
24. Immitzer, M. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classification in Central Europe/ M. Immitzer, F. Vuolo, C. Atzberger // *Remote Sensing*. – 2016. – No. 8(16). – P. 166-193.
25. Inglada, J. Operational high resolution land cover map production at the country scale using satellite image time series / J. Inglada, A. Vincent, M. Arias, B. Tardy, D. Morin, I. Rodes // *Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 9 (1), ID 95.
26. Kupkova, L. Classification of tundra vegetation in the Krkonose Mts. National Park using APEX, AISA Dual and Sentinel-2A data / L. Kupkova, L. Cervena, R. Sucha, J. Jakesova // *European Journal of Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 50. – P. 29-46.
27. Kurbanov, E.A. Tree species classification with Sentinel-2 data in European part of Russia / E.A. Kurbanov, O.N. Vorobev, S.A. Menshikov, M.S. Ali / *Earth observation advancements in a changing world*. – 2019. – Vol. 1. – P. 33-36
28. Land Cover Classification System [Electronic resource]. – URL: <http://www.fao.org/3/a-i5232e.pdf>
29. Lattakia agriculture directorate. Forest Fire Management Plan. – Lattakia, 2018. – P. 1-48.
30. Laurin, G.V. Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data / G.V. Laurin, N. Puletti, W. Hawthorne, V. Liesenberg, P. Corona, D. Papale, et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2016. – Vol. 176. – P. 163-176.
31. Legend of the global CCI-LC maps, based on LCCS [Electronic resource]. – URL: <https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>. – 25.12.2019
32. Leinenkugel, P. The potential of open geodata for automated large-scale land use and land cover classification / P. Leinenkugel, R. Deck, J. Huth, M. Ottinger, B. Mack // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, No. 19: ID 2249.
33. 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. – P. 173-192.
34. Lu, D. The roles of textural images in improving land-cover classification in the Brazilian Amazon / D. Lu, G. Li, E. Moran, L. Dutra, M. Batistella // *International Journal of Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 35. – P. 8188-8207.
35. Meyer, L.H. Comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 data for estimation of leaf area index in temperate forests / L.H. Meyer, M. Heurich, B. Beudert, J. Premier, D. Pflugmacher // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, No. 10. – ID: 1160.
36. Mohammady, M. A comparison of supervised, unsupervised and synthetic land use classification methods in the north of Iran / M. Mohammady, H.R. Moradi, H. Zeinivand, A.J.A.M. Temme // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2015. – No. 12. – P. 1515-1526.
37. Puletti, N. Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments / N. Puletti, F. Chianucci, C. Castaldi // *Annals of Silvicultural Research*. – 2018. – Vol. 42, No. 1.
38. Rujoiu-Mare, M.R. Land cover classification in Romanian Carpathians and Subcarpathians using multi-date Sentinel-2 remote sensing imagery / M.R. Rujoiu-Mare, B. Olariu, B.A. Mihai, C. Nistor, I. Savulescu // *European Journal of Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 50. – P. 496-508.

39. Zarco-Tejada, P.J. Chlorophyll content estimation in an open-canopy conifer forest with Sentinel-2A and hyperspectral imagery in the context of forest decline / P.J. Zarco-Tejada, A. Hornero, P.S.A. Beck, T. Kattenborn, P. Kempeneers, R. Hernández-Clemente // *Remote sensing of environment*. – 2019. – Vol. 223. – P. 320-335.

References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V. Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovyykh dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ [Assessment of the area of fires based on the integration of satellite data of various spatial resolutions MODIS and Landsat-TM / ETM +], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2012, T.9, No. 2, pp. 9-26.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii [Satellite mapping of Russian land cover], Moskva: IKI RAN, 2016, 208 p.
3. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A. Distantsionnyi monitoring vosstanovitel'noi dinamiki rastitel'nosti na garyakh Mariiskogo lesnogo Zavolzh'ya [Remote monitoring of the restoration dynamics of vegetation in the burned areas of the Mari forest Trans-Volga], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2017, No. 2 (14), pp. 124-134.
4. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Polevshchikova Yu.A., Lezhnin S.A. Prostranstvenno-vremennoi analiz dinamiki lesnogo pokrova v Srednem Povolzh'e po sputnikovym dannym [Space-time analysis of the dynamics of forest cover in the Middle Volga region using satellite data]: monografiya, Ioshkar-Ola: PGU, 2019, 200 p.
5. Vorob'ev O.N., Ali M.S. Klassifikatsiya lesnogo pokrova mukhafaza Latakia Siriiskoi Arabskoi Respubliki po dannym sputnika Sentinel-2 [Forest cover classification of Latakia governorate of the Syrian Arab Republic according to Sentinel-2 satellite], *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring* [Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring]: sbornik nauchnykh statei [Electronic resource], Ioshkar-Ola: PGU, 2018, No. 4, pp. 110-122, URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>
6. Elsakov V.V., Kulyugina E.E. Rastitel'nyi pokrov Yugorskogo poluostrova v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii poslednykh desyatiletii [Vegetation cover of the Ugra Peninsula under the conditions of climatic changes of recent decades], *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth exploration from space], 2014, No. 3, pp. 65-77.
7. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Men'shikov S.A., Smirnova L.N. Raspoznavanie lesnykh nasazhdenii i dominiruyushchikh drevesnykh porod Penzenskoi oblasti po dannym sputnika Sentinel-2 [Recognition of forest plantations and dominant tree species of the Penza region according to the Sentinel-2 satellite], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2018, T. 15, No. 5, pp. 154-166.
8. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A. Otsenka tochnosti i sopostavimosti tematicheskikh kart lesnogo pokrova raznogo prostranstvennogo razresheniya na primere Srednego Povolzh'ya [Evaluation of the accuracy and comparability of thematic maps of forest cover of different spatial resolutions on the example of the Middle Volga], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2016, T. 13, No. 1, pp. 36-48.
9. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N. Chetyre desyatiletia issledovaniy lesov po snimkam Landsat [Landsat's four decades of forest research], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Pririodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature management], 2014, No. 1(21), pp. 18-32.
10. Kurbanov E.A. Dva desyatiletia issledovaniy rastitel'nogo pokrova po MODIS [Two decades of land cover research by MODIS] [Electronic resource], *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring: sbornik nauchnykh statei* [Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring: A Collection of Scientific Articles], Ioshkar-Ola: PGU, 2016, No. 2, pp. 123-132, URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/Forest%20ecosystem%20under%20climate%20change%202016.pdf>
11. Khussein A., Movaffak D., Yusef V. Natsional'nyi doklad o biologicheskom raznoobrazii geneticheskikh resursov dlya proizvodstva prodovol'stviya i vedeniya sel'skogo khozyaistva v Siriiskoi Arabskoi Respublike [National report on the biological diversity of genetic resources for food and agriculture in the Syrian Arab Republic], Damask, 2016, 212 p.
12. Astola H., Häme T., Sirro L., Molinier M., Kilpi J. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 223, pp. 257-273
13. Cai S., Liu D., Sulla-Menashe D., Friedl M.A. Enhancing MODIS land cover product with a spatial-temporal modeling algorithm, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 147, pp. 243-255.
14. Chuvieco E. Fundamentals of satellite remote sensing: an environmental approach. Second Edition. Boca Raton, New York: CRC Press Taylor & Francis, 2016, 468 p.
15. Copernicus scientific data hub [Electronic resource], URL: <https://scihub.copernicus.eu/>
16. Cutler M.E.J., Boyd D.S., Foody G.M., Vetrivel A. Estimating tropical forest biomass with a combination of SAR image texture and Landsat TM data: An Assessment of Predictions Between Regions, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, Vol. 70, ID 042032, pp. 66-77.

17. Frampton W.J., Dash J., Watmough G., Milton E.J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation, *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 2013, Vol. 82, pp. 83-92.
18. Gomariz-Castillo F., Alonso-Sarriá F., Cánovas-García F. Improving classification accuracy of multi-temporal Landsat images by assessing the use of different algorithms, textural and ancillary information for a Mediterranean semi-arid area from 2000 to 2015, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9(10): 1058, pp. 1-23.
19. Grabska E., Hostert P., Pflugmacher D., Ostapowicz K. Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 10: 1197, pp. 1-24.
20. Helman D.A., Lensky I.M., Tessler N., Osem Y. A phenology-based method for monitoring woody and herbaceous vegetation in Mediterranean forests from NDVI time series, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, No. 9, 12314-12335.
21. Hepinstall-Cymerman J., Coe S., Alberti M. Using Urban Landscape Trajectories to Develop a Multi-Temporal Land Cover Database to Support Ecological Modeling, *Remote Sensing*, 2009, No. 1, pp. 1353-1379.
22. Hill M.J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated Sentinel 2 data for a North American transect, *Remote sensing of environment*, 2013, Vol. 137, pp. 94-111.
23. Huang H., Roy D.P., Boschetti L., Zhang H.K., Yan L., Kumar S.S. et al. Separability analysis of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) data for burned area discrimination, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 10, pp. 873.
24. Immitzer M., Vuolo F., Atzberger C. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classification in Central Europe, *Remote Sensing*, 2016, No. 8(16), pp. 166-193.
25. Inglada J., Vincent A., Arias M., Tardy B., Morin D., Rodes I. Operational high resolution land cover map production at the country scale using satellite image time series, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9 (1), ID 95.
26. Kupkova L., Cervena L., Sucha R., Jakesova J. Classification of tundra vegetation in the Krkonose Mts. National Park using APEX, AISA Dual and Sentinel-2A data, *European Journal of Remote Sensing*, 2017, Vol. 50, pp. 29-46.
27. Kurbanov E.A., Vorobev O.N., Menshikov S.A., Ali M.S. Tree species classification with Sentinel-2 data in European part of Russia, *Earth observation advancements in a changing world*, 2019, Vol. 1, pp. 33-36
28. Land Cover Classification System [Electronic resource], URL: <http://www.fao.org/3/a-i5232e.pdf>
29. Lattakia agriculture directorate. Forest Fire Management Plan, Lattakia, 2018, pp. 1-48.
30. Laurin G.V., Puletti N., Hawthorne W., Liesenberg V., Corona P., Papale D. et al. Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 176, pp. 163-176.
31. Legend of the global CCI-LC maps, based on LCCS [Electronic resource], URL: <https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer>, 25.12.2019
32. Leinenkugel P., Deck R., Huth J., Ottinger M., Mack B. The potential of open geodata for automated large-scale land use and land cover classification, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 19: ID 2249.
33. Loboda T., Krankina O., Savin I., Kurbanov E., Joanne H. Land Management and the impact of the 2010 extreme drought event on the agricultural and ecological systems of European Russia, *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, Eds. G. Gutman, R. Volker, Springer International Publishing, 2017, pp. 173-192.
34. Lu D., Li G., Moran E., Dutra L., Batistella M. The roles of textural images in improving land-cover classification in the Brazilian Amazon, *International Journal of Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, pp. 8188-8207.
35. Meyer L.H., Heurich M., Beudert B., Premier J., Pflugmacher D. Comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 data for estimation of leaf area index in temperate forests, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 10, ID: 1160.
36. Mohammady M., Moradi H.R., Zeinivand H., Temme A.J.A.M. A comparison of supervised, unsupervised and synthetic land use classification methods in the north of Iran, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, No. 12, pp. 1515-1526.
37. Puletti N., Chianucci F., Castaldi C. Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments, *Annals of Silvicultural Research*, 2018, Vol. 42, No. 1.
38. Rujoiu-Mare M.R., Olariu B., Mihai B.A., Nistor C., Savulescu I. Land cover classification in Romanian Carpathians and Subcarpathians using multi-date Sentinel-2 remote sensing imagery, *European Journal of Remote Sensing*, 2017, Vol. 50, pp. 496-508.
39. Zarco-Tejada P.J., Hornero A., Beck P.S.A., Kattenborn T., Kempeneers P., Hernández-Clemente R. Chlorophyll content estimation in an open-canopy conifer forest with Sentinel-2A and hyperspectral imagery in the context of forest decline, *Remote sensing of environment*, 2019, Vol. 223, pp. 320-335.

ОЦЕНКА ВТОРИЧНОЙ СУКЦЕССИИ НА ЗАЛЕЖАХ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ

С. А. Лежнин, Р. Л. Музурова

Поволжский государственный технологический университет

В работе изложены основные результаты исследования вторичной сукцессии на землях залежей Республики Марий Эл по спутниковым снимкам Landsat 8. Использование спутниковых данных для изучения зарастающих участков земель запаса является эффективным и перспективным направлением современных научных исследований. Анализ научной литературы показал недостаточный уровень использования средств дистанционного зондирования Земли для мониторинга зарастания залежей в Российской Федерации. В ходе исследования установлено, что в Республике Марий Эл наблюдается устойчивая ситуация с зарастанием залежей молодняками древесных пород. Общая площадь сельскохозяйственных угодий республики составляет 451629,5 га. Больше четверти всех сельскохозяйственных территорий зарастают древесно-кустарниковой растительностью: на 18,04 % от всей площади происходит возобновление лиственных пород, на 13,34 % – хвойных пород. Общая точность полученной тематической карты составила 87,5 %, что является высоким показателем точности проведенных работ. Коэффициент Кеппа составил 0,83, что свидетельствует о высокой согласованности полученной тематической карты натурным данным. Вместе с тем, сравнение карт 2019 и 2016 годов показало незначительную тенденцию по улучшению сложившейся ситуации: только часть из заросших залежей вернулась в сельскохозяйственный оборот. Стоит отметить, что оценка зарастания сельскохозяйственных земель древесными породами должна включать в себя не только оценку площадей, но и другие характеристики вновь появившихся лесных экосистем, такие как густота, возраст или запас фитомассы. Кроме того, требуется проведение комплексного анализа всех причин, которые приводят к этому процессу: социально-экономические факторы, плотность населения и степень развития инфраструктуры.

Ключевые слова: залежи, спутниковые снимки, ArcGIS, ENVI, тематическая карта, оценка точности, Landsat 8.

ESTIMATION OF SECONDARY SUCCESSION ON THE ABANDONED AGRICULTURAL LANDS IN MARI EL REPUBLIC

S. A. Lezhnin, R. L. Muzurova

Volga State University of Technology

The paper presents the results of research into secondary succession on the abandoned agricultural lands in Mari El Republic using Landsat 8 satellite images. The use of satellite data to study these lands is a priority research area nowadays. The research literature review proved that remote sensing methods are underused for the monitoring of overgrown abandoned agricultural lands in the Russian Federation. As a result of research it has been revealed that the abandoned lands in Mari El Republic are gradually overgrown with young stock of timber species. The total area of agricultural lands in the Republic is 451,629.5 ha. More than a quarter of all agricultural lands are overgrown with tree and shrub vegetation: 18.04% of the total area is naturally regenerated with hardwoods, 13.34 % – with coniferous species. The overall accuracy of the obtained thematic map is 87.5 %, which proves that the work has been carried out with high accuracy. Kappa coefficient is 0.83, which indicates a high consistency of the obtained thematic map with full-scale data. At the same time, the comparative analysis of thematic maps from 2016 and 2019 showed a slight improvement of the current situation - the overgrown abandoned lands have been partly converted into agricultural use. The assessment of overgrowth of agricultural lands with timber species should include not only the assessment of areas, but also other characteristics of new forest ecosystems, such as density, age or phytomass stock. Moreover, a comprehensive analysis of all the caus-

es leading to overgrowing should be carried out including the analysis of socio-economic factors, population density and the degree of infrastructure development.

Keywords: *abandoned agricultural lands, satellite images, ArcGIS, ENVI, thematic maps, accuracy assessment, Landsat 8.*

Введение

Заращение заброшенных сельскохозяйственных угодий лесной и кустарниковой растительностью является на сегодняшний день актуальной проблемой не только в России, но и во многих зарубежных странах. Среди основных причин данного явления можно выделить смену парадигмы лесо- и землепользования, изменение климата как на региональном, так и на глобальном уровнях, мировые продовольственный и экономический кризисы.

В Российской Федерации главными причинами появления древесно-кустарниковой растительности на заброшенных сельскохозяйственных полях являются смена экономического строя в конце XX столетия, значительный отток работающего населения на городские территории, а также переход к фермерскому хозяйству. В этот период значительно (практически в 20 раз) сократилось государственное финансирование сельскохозяйственной отрасли (Ерусалимский, 2011). Результатом стало то, что многие совхозы и колхозы прекратили свою деятельность, те же, которые продолжили работу, не могли в полной мере использовать весь потенциал сельскохозяйственных угодий. Отсутствие финансирования стало главной причиной отказа от применения дорогостоящих удобрений, что привело к снижению урожайности и отсутствию обработки части земель.

До настоящего времени нет полноценной системы учета и оценки заброшенных сельскохозяйственных земель (залежей), в том числе и древесно-кустарниковой растительности на них. Вместе с тем данной проблемой занимается значительное количество исследовательских коллективов как в России, так и за рубежом (Новоселова, 2007; Kuemmerle et al., 2008).

В 2012 году группа ученых (Прищепов и др., 2012) провела работу по оценке распределения заброшенных сельскохозяйственных земель в ряде стран Восточной Европы (Польша, Беларусь, прибалтийские страны, Российская Федерация). Результаты исследования показали, что по сравнению с 1990 годом уже к 2000 году было заброшено около 27 % сельскохозяйственных угодий. Лидером в этом процессе оказалась Латвия, где работы перестали вести на 42 % всех сельскохозяйственных площадей. Значительное количество угодий осталось без обработки в России (31,3 %) и Литве (28,4 %). В Беларуси и Польше оказалось примерно количество залежей (13,5 % и 14 % соответственно). Из российских регионов наихудшее положение в сельском хозяйстве оказалось в Смоленской области, где было заброшено около 46 % сельхозугодий (в некоторых районах региона этот показатель достигал 60 %) (Prishchepov et al., 2012).

Необходимо отметить, что изучение проблемы зарастания залежей массово началось с 2008 года. К примеру, Институт географии РАН изучал динамику зарастания залежей лесной растительностью в различных условиях (Ерусалимский, 2011). Результатом исследования стали данные о том, что состав молодняков леса на залежах зависит от почв, расстояния до стены леса и размеров заброшенного участка. Ученые сделали вывод, что при достаточном количестве рубок ухода на заросших залежах можно сформировать устойчивые смешанные насаждения (Люри и др., 2010).

В Российской Федерации по отдельным данным зарастает лесной растительностью до 70 млн га залежей. Основные площади зарастания расположены в Европейской части России (Сонген и др., 2005).

Ученые из Швейцарии с помощью спутниковых данных обнаружила существенное влияние изменений в сельском хозяйстве на депонирование и запасы углерода, особенно в гор-

ной местности (Bolliger et al., 2008). Группа под руководством Ruskule определила факторы, которые влияют на ход зарастания залежных земель на начальном этапе, а также породный состав деревьев-пионеров (Ruskule et al., 2016). Считается, что появление древесной растительности на заброшенных сельскохозяйственных угодьях способствует увеличению общего биоразнообразия региона, поэтому такие участки необходимо включать в лесной фонд (Zakkak, 2018). Другой точкой зрения на возможность сохранения лесной растительности на залежах являются выводы группы ученых, изучавших лесовосстановление в австралийских тропических нагорьях (Shoo et al., 2016), которые пришли к заключению, что продуктивность сукцессионных насаждений на залежах сравнима с эталонными тропическими лесами.

Несмотря на активное изучение рассматриваемой проблемы, в мировой научной литературе достаточно слабо освещены вопросы использования средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для оценки и мониторинга зарастания залежей. Тем не менее, работы в этом направлении ведутся (Cord et al., 2017). Использование спутниковых снимков для проведения подобных исследований является важным направлением, т.к. современные технологии способны оценить значительные площади с наименьшими финансовыми и человеческими трудозатратами (Курбанов и др., 2014; Курбанов и др., 2015; Воробьев и др., 2015).

Ученые из Польши изучили возможность использования лидарной съемки для автоматического картирования изменений в землепользовании (Weżyk et al., 2018). Особое внимание в их исследовании было посвящено процессу вторичной сукцессии лесной растительности на залежных землях.

Особое распространение в последние годы получили методы мониторинга заброшенных сельскохозяйственных земель с использованием дополнительной информации, получаемой со спутников: различные виды спектральных преобразований, индексы растительности и другие подходы (Воробьев, Курбанов, 2017; Johansson, 2007; Lucas et al., 2007; Pinto, Fernandes, 2011).

Группа европейских специалистов разработала метод картографирования залежей с использованием индекса растительности NDVI, результатом которого стала общеевропейская карта участков сельскохозяйственных угодий, заросших древесно-кустарниковой растительностью (Estel et al., 2015).

В Республике Марий Эл неоднократно проводились исследования, затрагивающие тему зарастания залежей древесной растительностью. Были изучены возможности различных спутниковых систем в подобных научных изысканиях. К примеру, спутниковые снимки Landsat-8 в сочетании 6,5 и 2 спектральных каналов являются оптимальными для оценки формирующихся на залежах лесных экосистем (Лежнин, 2016). Для исследования этой же территории применялись и спутниковые снимки высокого разрешения (RapidEye и Alos). Проводимые работы показали, что высокое разрешение положительно сказывается на породной разделимости. Кроме того, подобные спутниковые снимки применимы для выявления и оценки площадей зарастания лесной растительностью заброшенных сельскохозяйственных угодий (Лежнин, 2013).

Главной **целью исследования** был мониторинг площадей участков лесных экосистем, сформировавшихся на залежах с помощью данных среднего разрешения Landsat-8 за период с 2016 по 2019 год.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- закладка тестовых участков на залежах на северо-востоке Республики Марий Эл;
- создание тематической карты зарастающих сельскохозяйственных угодий 2019 года;
- сравнение тематических карт 2016 и 2019 годов для выявления динамики площадей вторичной сукцессии на залежах.

Материалы и методы

Полевые исследования

Летом 2019 года на территории исследования было заложено 140 тестовых площадей (ТП) с привязкой их к спутниковым снимкам в программном комплексе ArcGIS. Выбор места закладки тестовых участков был обусловлен наличием на них древесной растительности. Захватывались как участки зарастания, так и контрольные участки, земля на которых свободна от деревьев (рис. 1).

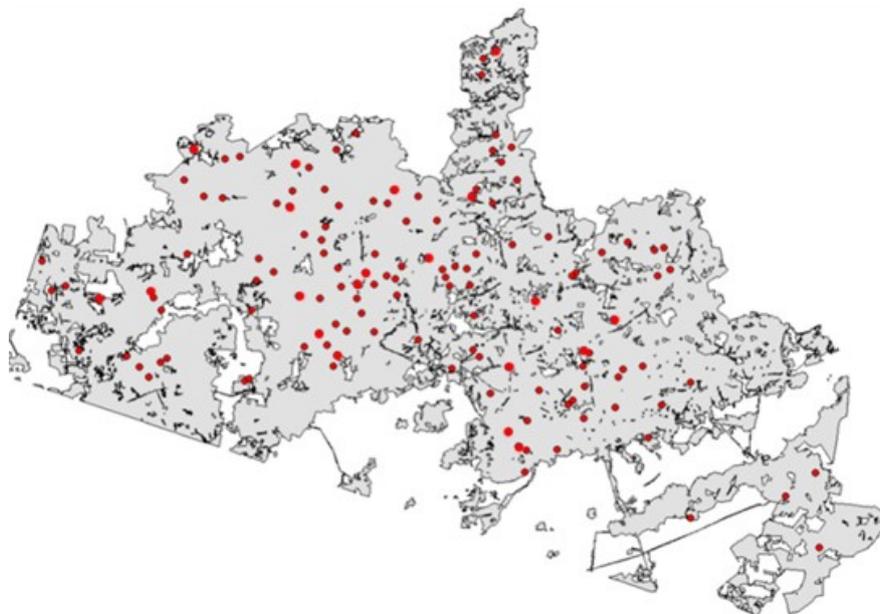


Рис.1. Распределение заложенных тестовых участков на территории исследования

Основой исследования было картографирование молодняков хвойных и лиственных пород на залежах северо-восточной части Республики Марий Эл по спутниковым снимкам Landsat-8 за летний период 2019 года (рис. 2). Подобранный снимок прошел процедуры атмосферной и геометрической коррекции в программном комплексе ENVI.

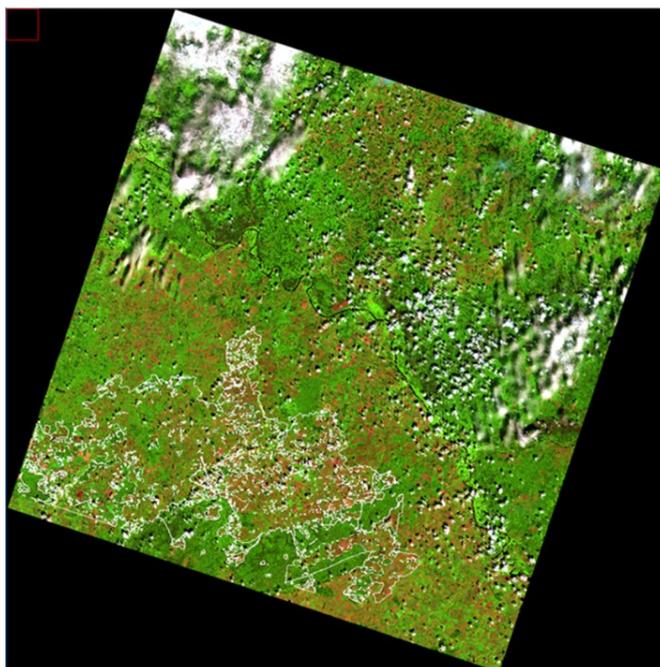


Рис..2. Сцена Ландсат-8 (сочетание 6-5-2 спектральных каналов), используемая в работе (белым цветом выделена непосредственно территория исследования)

Чтобы улучшить породную разделимость, снимок прошел процедуру Pan-Sharpening, в результате которой пространственное разрешение исходного снимка увеличилось с 30 до 15 м (рис. 3).

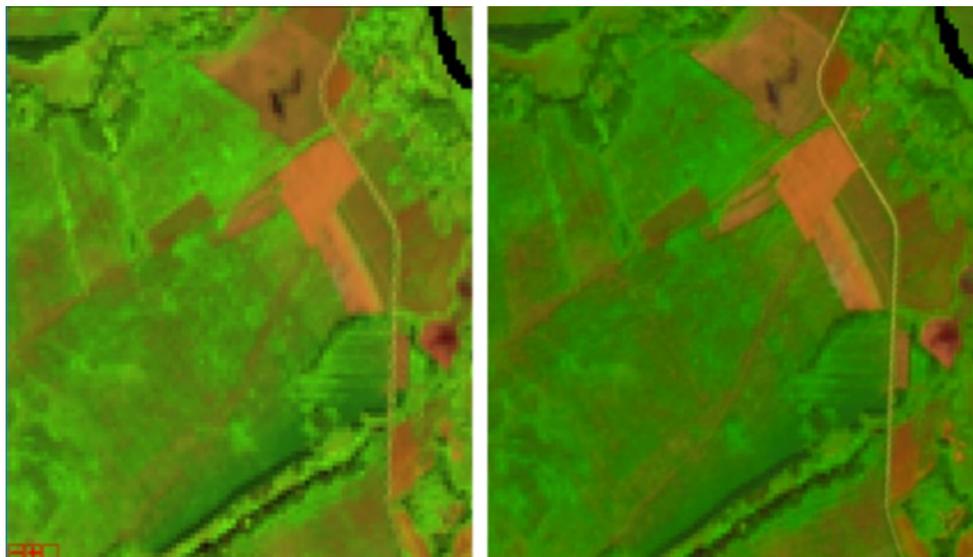


Рис. 3. Фрагмент спутникового снимка Landsat 8 до и после процедуры Pan-Sarpening

Для получения тематической карты была проведена управляемая классификация методом максимальной правдоподобности, где в качестве опорных данных были использованы заложенные ТП. На тематической карте было выделено 5 классов: используемые сельскохозяйственные земли, зарастание залежей лиственными породами, зарастание залежей хвойными породами, водные объекты и лесные территории.

Результаты исследования и их обсуждение

Результатом управляемой классификации подготовленного снимка стала тематическая карта на 5 классов, которая позволила выявить расположение участков зарастания неиспользуемых сельскохозяйственных земель древесной растительностью (рис. 4).

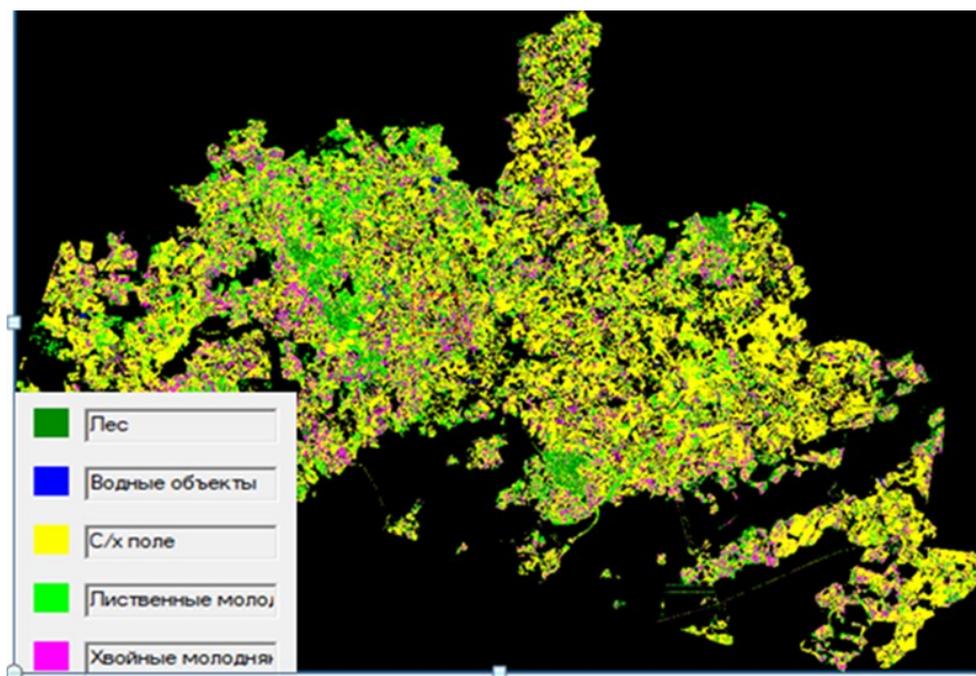


Рис. 4. Тематическая карта лесовозобновления на залежах северо-восточной части Республики Марий Эл

По полученной карте проведена оценка площади каждого класса, результаты которой представлены в таблице 1.

Таблица 1

Распределение площадей тематической карты

Класс	Площадь, га	Доля от общей площади сельскохозяйственных земель, %
Лесные участки	39738,15	8,81
Используемые сельскохозяйственные земли	268022,28	59,31
Водные объекты	2068,11	0,47
Хвойные молодняки на залежах	60391,35	13,37
Лиственные молодняки на залежах	81409,61	18,04
Итого:	451629,5	100

Как видно из таблицы, общая площадь сельскохозяйственных земель северо-восточной части Республики Марий Эл составила 451629,5 га. 18,04 % исследуемой территории занято молодняками лиственных пород, тогда как хвойные породы возобновились на 13,37 % общей площади. Такие цифры говорят о значительном количестве залежей в республике.

Для оценки точности полученной тематической карты была создана матрица различий с использованием 120 контрольных точек, набранных пропорционально площадям полученных классов (табл. 2). При этом на каждый класс было набрано не менее 20 тестовых точек, исключение составил только класс водных объектов, для которого было собрано 10 тестовых точек, т.к. он занимает совсем небольшую площадь на территории исследования.

Таблица 2

Матрица различий тестовых участков

Класс	Лесные участки	Используемые сельскохозяйственные земли	Водные объекты	Хвойные молодняки на залежах	Лиственные молодняки на залежах	Итого
Лесные участки	17	2	0	0	1	20
Используемые сельскохозяйственные земли	3	45	0	1	2	51
Водные объекты	0	0	10	0	0	10
Хвойные молодняки на залежах	0	1	0	17	1	19
Лиственные молодняки на залежах	0	2	0	2	16	20
Итого:	20	50	10	20	20	120

Очевидно, что точность выявления используемых сельскохозяйственных земель составила 90 % (45 участков, попавших в класс, из 50 возможных). Лиственные молодняки на залежах выявились с точностью 80 % (16 участков из 20), а хвойные – с точностью 85 % (17 участков из 20). Общая точность полученной карты составила 87,5 %, что является очень высоким результатом. Коэффициент Каппа, показывающий соответствие тематической карты эмпирическим данным составил 0,83, что говорит о высокой согласованности полученной тематической карты с натурными данными.

Для выявления динамики площадей вторичной сукцессии на залежах была создана карта различий обнаружения изменений. Этот метод позволяет увидеть различие разновременных карт исследуемой территории, с указанием участков положительных и отрицательных изменений. Полученная карта (рис. 5) была сравнена с тематической картой 2016 года, полученной в ходе ранее проведенных исследований (Лежнин, 2016).

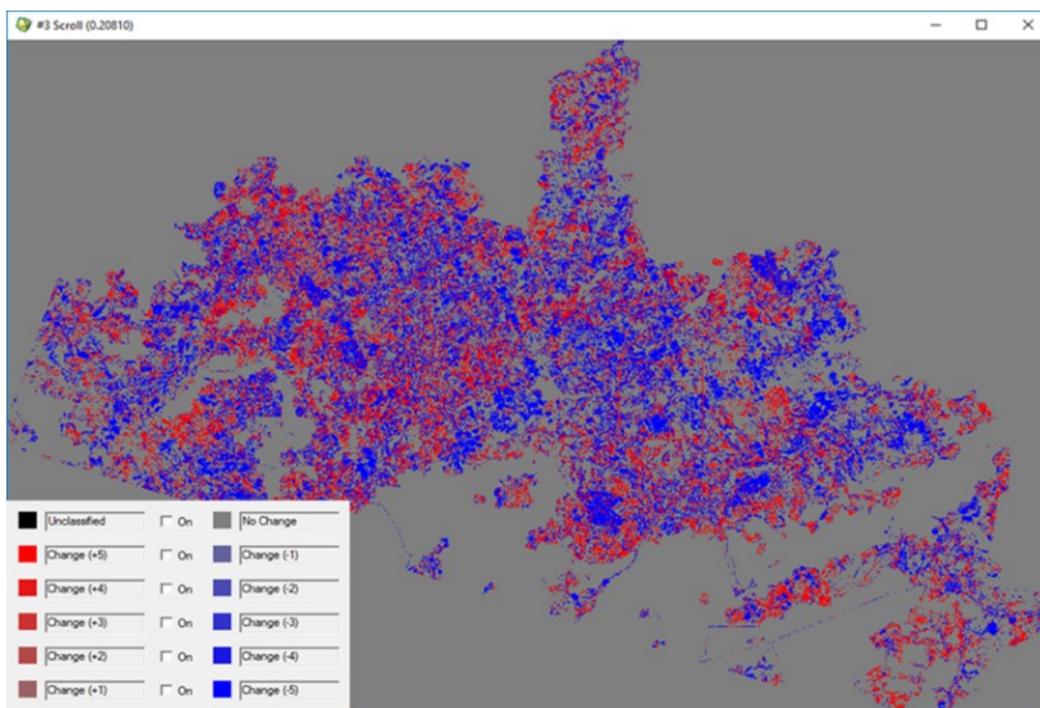


Рис. 5. Карта изменений с 2016 по 2019 год

Синим цветом на карте обозначены участки, на которых сельскохозяйственные поля начали вновь обрабатываться. Подобные изменения составили 10,64 % от всей территории исследования. Красным цветом обозначены территории, которые за прошедший период заросли древесно-кустарниковой растительностью. Площадь этих участков составила 7,31 % от территории исследования. В целом можно сделать вывод, что в Республике Марий Эл наблюдается незначительная тенденция по возвращению залежных земель в сельскохозяйственный оборот.

Выводы

Созданная в ходе исследования карта зарастающих сельскохозяйственных земель за 2019 год подтвердила факт наличия залежей, на которых произошла вторичная сукцессия древесными породами. Принадлежность исследуемых участков землям фонда запаса и перераспределения подтверждается кадастровыми данными Министерства государственного имущества Республики Марий Эл. Результаты исследования показали высокие точность эксперимента и соответствие полученной тематической карты натурным данным.

Выявленная площадь сельскохозяйственных угодий республики составила 451629,5 га. Больше четверти всех сельскохозяйственных территорий зарастают древесно-кустарниковой растительностью: 18,04 % всей площади занимает возобновление лиственных пород, 13,34 % – возобновление хвойных пород. Вместе с тем сравнение карт 2019 и 2016 годов показало незначительную тенденцию по улучшению сложившейся ситуации, часть из заросших залежей вернулась в сельскохозяйственный оборот.

Применение современных дистанционных технологий позволяет в достаточной точностью проводить мониторинг залежей на предмет возобновления на них древесных пород. Вместе с тем стоит отметить, что методы оценки зарастания сельскохозяйственных земель древесными породами должны совершенствоваться и включать в себя не только оценку площадей, но и другие характеристики появившихся лесных экосистем, такие как густота, возраст или запас фитомассы. Кроме того, необходимо проведение и комплексного анализа всех причин, которые привели к тому, что сельскохозяйственные земли оказались заброшенными,

таких как социально-экономические факторы, плотность населения и степень развития инфраструктуры.

Проект выполнен в рамках Гранта Президента РФ МК-6343.2018.11 «Разработка методов и технологии дистанционного мониторинга и прогнозирования нарушений режима использования сельскохозяйственных земель для снижения риска экологических катастроф»

Библиографический список

1. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг городских лесов / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева, О.В. Коптелов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 1(25). – С. 5-21.
2. 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.
3. Ерусалимский, В.И. Лес и пашня / В.И. Ерусалимский // Лесное хозяйство. – 2011. – № 2. – С. 14-15.
4. 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: ПГТУ, 2015. – 131 с.
5. 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.
6. Лежнин, С.А. Дистанционный метод оценки формирования молодяков на залежах Марийского лесного Заволжья по спутниковым снимкам: автореф.дисс...канд.с.-х. наук / С.А. Лежнин. – Йошкар-Ола, 2013. – 22 с.
7. Лежнин, С.А. Мониторинг зарастающих сельскохозяйственных земель Республики Марий Эл по снимкам LANDSAT-8 / С. А. Лежнин // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. – Йошкар-Ола, 2016. – С. 192-199.
8. Люри, Д.И. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX в. и постагрогенное восстановление растительности и почв / Д.И. Люри, С.В. Горячкин, Н.А. Караваяева и др. – Москва: ГЕОС М, 2010. – 416 с.
9. Новоселова Н.Н. Формирование лесных насаждений на землях, вышедших из под сельскохозяйственного пользования в таежной зоне Пермского края: автореф.дисс...канд.с.-х. наук. / Н.Н. Новоселова. – Екатеринбург, 2007. – 21 с.
10. Прищепов, А.В. Влияние институциональных и социоэкономических изменений после распада СССР на сельскохозяйственное землепользование в Восточной Европе / А.В. Прищепов, Ф.С. Раделлофф, М. Бауманн, Т. Кюммерле, Д. Мюллер // Земля из космоса. – 2012. – Вып. 14. – С. 7-14.
11. Сонген, Б. Запасы и потоки углерода в лесном и земельном фондах России: инвентаризация и потенциал смягчения последствий климатических изменений / Б. Сонген, К. Андраско, М. Гитарский, Г. Коровин и др. – Москва: ЦЭПЛ, 2005. – 51 с.
12. Bolliger J, Effects of land-use change on carbon stocks in Switzerland / J. Bolliger, F. Hagedorn, J. Leifeld, J. Bohl, S. Zimmermann, R. Soliva, F. Kienast // Ecosystems. – 2008. – No. 11 (6). – P. 895-907.
13. Cord, A. Priorities to Advance Monitoring of Ecosystem Services Using Earth Observation / A.F. Cord, K.A. Brauman, R.Shaplin-Kramer, A. Huth, G. Ziv, R. Zeppelt // Trends in Ecology & Evolution. – 2017. – P. 416-428.
14. Estel, S. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series / S Estel, T Kuemmerle, C Alcántara, C Levers, A Prishchepov, P. Hostert // Remote Sensing of Environment. – 2015. – P.312-325.
15. Johansson, T. Biomass production and allometric above- and below-ground relations for young birch stands planted at four spacings on abandoned farmland / T. Johansson // Institute of Chartered Foresters, 2007. – 12 p.
16. Kuemmerle, T. Gross-border comparison of post-socialist farmland abandonment in the Carpathians / T. Kuemmerle, P. Hostert, V.C. Radeloff, S. van der Linden, K. Perzanowski, I. Krühlov // Ecosystems. – 2008. – No. 11. – P. 614-628.
17. Lucas, R. Rule-based classification of multi-temporal satellite imagery for habitat and agricultural land cover mapping / R. Lucas, A. Rowlands, A. Brown, S. Keyworth, P. Bunting // ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. – 2007. – No. 62. – P. 165-185
18. Pinto, L. Multitemporal analyses of the vegetation cover of coastal sand dune ecosystems in Natal/RN, based on NDVI index / L. Pinto, L. Fernandes // Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBR, Curitiba, PR, Brasil, 2011. – P.1895.
19. Prishchepov, A. V. Agricultural land abandonment during the transition from state-command to market-driven economies in post-Soviet Eastern Europe. Effects of institutional changes on land use / A.V. Prishchepov, V.C. Radeloff, M. Baumann, T. Kuemmerle, D. Muller // Environmental Research Letters. – 2012. – P. 7-13.
20. Ruskule, A. Soil – vegetation interactions in abandoned farmland within the temperate region of Europe / A. Ruskule, O. Nikodemus, R. Kasparinskis, D. Prizavoite, D.Bojare, G. Brumelis // New Forest. – 2016. –Vol.47 (4). – P. 587-605.

21. Shoo, L. Slow recovery of tropical old-field rainforest regrowth and the value and limitations of active restoration / L. Shoo, K. Freebody, J. Kanovski, C. Catterall // *Conservation Biology*. – 2015. – Vol.30 (1). – P. 121-132
22. Wężyk, P. Landscape monitoring of post-industrial areas using LiDAR and GIS technology / P. Wężyk, M. Szostak, W. Krzaklewski, M. Pająk, M. Pierzchalski, P. Szwed, P. Hawryło, M. Ratajczak // *Geodesy and cartography*. – 2015. – Vol. 64, No. 1. – P. 125-137.
23. Zakkak, S. Vegetation patterns along agricultural land abandonment in the Balkans / S. Zakkak, A. Radovic, M. Panitsa, K. Vassilev, L. Shuka, M. Kutner, S. Schindler, V. Kati // *Journal of Vegetation Science*. – 2018. – Vol.29 (5) – P. 877-886.

References

1. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N., Koptelov O.V. Distantionnyi monitoring gorodskikh lesov [Remote monitoring of urban forests], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature management], 2015, No. 1(25), pp. 5-21.
2. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A. Distantionnyi monitoring vosstanovitel'noi dinamiki rastitel'nosti na garyakh Mariiskogo lesnogo Zavolzh'ya [Remote monitoring of the restoration dynamics of vegetation in the burned areas of the Mari forest Trans-Volga], *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2017, No. 2 (14), pp. 124-134.
3. Erusalimskii V.I. Les i pashnya [Forest and arable land], *Lesn. khoz-vo [Lesn. household]*, 2011, No. 2, pp. 14–15.
4. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Lezhnin S.A., Gubaev A.V., Polevshchikova Yu.A. Tematicheskoe kartirovanie rastitel'nogo pokrova po sputnikovym snimkam: validatsiya i otsenka tochnosti [Thematic mapping of vegetation by satellite imagery: validation and accuracy assessment]: monografiya, Ioshkar-Ola: PGU, 2015, 131 p.
5. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N. Chetyre desyatiletiya issledovaniy lesov po snimkam Landsat [Landsat's four decades of forest research], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature management], 2014, No. 1(21), pp. 18-32.
6. Lezhnin S.A. Distantionnyi metod otsenki formirovaniya molodnyakov na zalezkh Mariiskogo lesnogo Zavolzh'ya po sputnikovym snimkam [A remote method for assessing the formation of young growth in the deposits of the Mari forest Trans-Volga region using satellite images]: avtoref. dis... kand. s.-kh. nauk, Yoshkar-Ola, 2013, 22 p.
7. Lezhnin S.A. Monitoring zarastayushchikh sel'skokhozyaistvennykh zemel' Respubliki Marii El po snimkam LANDSAT-8 [Monitoring of overgrown agricultural land of the Mari El Republic according to images of LANDSAT-8], *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantionnyi monitoring* [Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring], Ioshkar-Ola, 2016, pp. 192-199.
8. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A. i dr. Dinamika sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii v XX v. i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv [The dynamics of agricultural land in Russia in the twentieth century. and post-agrogen restoration of vegetation and soil], Moskva: GEOS M, 2010, 416 p.
9. Novoselova N.N. Formirovanie lesnykh nasazhdenii na zemlyakh, vshedshikh iz pod sel'skokhozyaistvennogo pol'zovaniya v taezhnoi zone Permskogo kraja [The formation of forest plantations on lands that have been abandoned for agricultural use in the taiga zone of the Perm Territory]: avtoref. dis... kand. s.-kh. nauk, Ekaterinburg, 2007, 21 p.
10. Prishchepov A.V., Radeloff F.S., Baumann M., Kyummerle T., Myuller D. Vliyanie institutsionnykh i sotsioekonomicheskikh izmenenii posle raspada SSSR na sel'skokhozyaistvennoe zemlepol'zovanie v Vostochnoi Evrope [The impact of institutional and socioeconomic changes after the collapse of the USSR on agricultural land use in Eastern Europe], *Zemlya iz kosmosa* [Earth from space], 2012, Vyp. 14, pp. 7-14.
11. Songen B., Andrasko K., Gitarskii M., Korovin G. i dr. Zapasy i potoki ugleroda v lesnom i zemel'nom fondakh Rossii: inventarizatsiya i potentsial smyagcheniya posledstviy klimaticheskikh izmenenii [Carbon stocks and flows in the forest and land funds of Russia: inventory and mitigation potential of climate change], Moskva: TsEPL, 2005, 51 p.
12. Bolliger J., Hagedorn F., Leifeld J., Bohl J., Zimmermann S., Soliva R., Kienast F. Effects of land-use change on carbon stocks in Switzerland, *Ecosystems*, 2008, No. 11 (6), pp. 895-907.
13. Cord A., Brauman K.A., Shaplin-Kramer R., Huth A., Ziv G., Zeppelt R. Priorities to Advance Monitoring of Ecosystem Services Using Earth Observation, *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, pp. 416-428.
14. Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series, *Remote Sensing of Environment*, 2015, pp. 312-325.
15. Johansson T. Biomass production and allometric above- and below-ground relations for young birch stands planted at four spacings on abandoned farmland, *Institute of Chartered Foresters*, 2007, 12 p.
16. Kuemmerle T., Hostert P., Radeloff V.C., van der Linden S., Perzanowski K., Kruhlov I. Gross-border comparison of post-socialist farmland abandonment in the Carpathians, *Ecosystems*, 2008, No. 11, pp. 614–628.
17. Lucas R., Rowlands A., Brown A., Keyworth S., Bunting P. Rule-based classification of multi-temporal satellite imagery for habitat and agricultural land cover mapping, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2007, No. 62, pp. 165-185.
18. Pinto L., Fernandes L. Multitemporal analyses of the vegetation cover of coastal sand dune ecosystems in Natal/RN, based on NDVI index, *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2011, pp.1895.

19. Prishchepov A. V., Radeloff V.C., Baumann M., Kuemmerle T., Muller D. Agricultural land abandonment during the transition from state-command to market-driven economies in post-Soviet Eastern Europe. Effects of institutional changes on land use, *Environmental Research Letters*, 2012, pp. 7-13.
20. Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinskis R., Prizavoite D., Bojare D., Brumelis G. Soil – vegetation interactions in abandoned farmland within the temperate region of Europe, *New Forest*, 2016, Vol.47 (4), pp. 587-605.
21. Shoo L., Freebody K., Kanovski J., Catterall C. Slow recovery of tropical old-field rainforest regrowth and the value and limitations of active restoration, *Conservation Biology*, 2015, Vol.30 (1), pp. 121-132.
22. Wężyk P., Szostak M., Krzaklewski W., Pająk M., Pierzchalski M., Szwed P., Hawryło P., Ratajczak M. Landscape monitoring of post-industrial areas using LiDAR and GIS technology, *Geodesy and cartography*, 2015, Vol. 64, No. 1, pp. 125-137.
23. Zakkak S., Radovic A., Panitsa M., Vassilev K., Shuka L., Kutner M., Schindler S., Kati V. Vegetation patterns along agricultural land abandonment in the Balkans, *Journal of Vegetation Science*, 2018, Vol.29 (5), pp. 877-886.

MONITORING SOIL EROSION BY USE OF REMOTE SENSING AND GIS TECHNOLOGY IN THE SUBTROPICAL ISLAND, PINGTAN, CHINA

Tianyue Xu¹, Jinming Sha^{1,2}, Xiaomei Li^{3*}

¹College of Geography, Fujian Normal University, China

²China-Europe Environment Center, Fujian Normal University, China

³College of Environmental Science & Engineering, Fujian Normal University, China

Soil erosion is the main environmental problem for subtropical coastal area in China with the rapid urbanization and fast development, it leads to the regional land degradation and weakening of the local ecological service. Monitoring regional soil erosion is necessary for the regional sustainable development. The paper takes Pingtan, Fujian, China as a case study area, it develops the technology for quantitative evaluation of soil erosion by the use of Landsat-8 imagery and DEM data based on USLE model. The results can provide benefit suggestion for local sustainable planning and eco-environmental protection.

Key words: USLE, soil erosion, vegetation coverage, Landsat, Pingtan Island, AHP.

1. Introduction

Soil erosion not only poses a threat to environmental security but also endangers human settlements. The harms of near-soil erosion are manifested in the following aspects: the erosion of the farming layer of soil, which causes continuous deterioration of land fertility; silting rivers, channels, and reservoirs, endangering the benefits of water conservancy and hydropower projects affecting industrial and agricultural production, etc. A significant hidden danger has been revealed.

Due to the characteristics of a large amount of data and a wide range of water and soil loss, traditional monitoring methods cannot accurately provide high-precision water and soil loss related information. Given that remote sensing technology has the characteristics of large-area simultaneous observation, timeliness, and periodicity, the powerful spatial analysis capability of GIS technology also provides essential technical support for the large-scale direct acquisition of water and soil information in watersheds.

In 1959, Wischmeier W.H. (1959) first proposed the Universal Soil Loss Equation (USLE). Chinese scholars are rooted in the local situation. Through a continuous search for data and research, they have determined the calculation methods for various factors in the USLE model commonly used in China (Yong et al., 2013). There are many methods for determining the weight of erosion factors based on GIS, including the analytic hierarchy process, principal component analysis method, fuzzy comprehensive evaluation method and grey correlation degree method (Wang et al., 2001). Analytic hierarchy process is a multi-objective decision analysis method that combines qualitative and quantitative analysis methods. The main idea is to build a hierarchical model, compare the importance of the target influencing factors, and establish a corresponding judgment matrix, so that the eigenvalues of the formed matrix and the corresponding eigenvectors can be used to further calculate the weights of each factor. So as to judge the degree of its impact on the target, and then provide a reference for the best solution.

Based on USLE model, this paper makes the current soil erosion monitoring and evaluation in Pingtan Island, and uses the potential soil erosion model to calculate the future erosion change trend, and uses the analytic hierarchy process to improve the USLE model.

Pingtán island is located in the area 25°15'N 119°32'E, 25°45'N, 120°10'E, the eastern part of Fujian Province. The coastline is winding and deep. The terrain is dominated by the marine plains, with hills in the north and south. Pingtan has a subtropical maritime monsoon climate, with warm winters and cool summers, it is humid and mild, the average annual precipitation is about 1,200 mm. Since 2010, the island has been regarded as the experimental economic district by the national

government, the development of the island is featured as rapid urbanization. What is the environmental impact of this kind of development? What is the present regional environmental problem of this island? Soil erosion monitoring by use of RS and GIS technology is necessary for the local policy-makers.

There are relatively few articles on soil and water conservation in the Pingtan area. This analysis can roughly grasp the typical characteristics and distribution patterns of soil erosion in the South China Sea, represented by Pingtan, and is a coastal area. A solid foundation has been laid for the smooth implementation of soil and water conservation work.

2. Data and Methodology

The data includes Landsat 8-OLI image, Spot image, DEM, rainfall data, and soil classification map (table 1).

Table 1

Data and source	
Data	Source
17, Nov, 2013 Landsat 8-OLI image	https://earthexplorer.usgs.gov/
2013 SPOT image	Purchasing data
DEM	http://www.gscloud.cn/
rainfall	http://rp5.ru/
Soil classification map	1: 250000 (1990)

The USLE model was used to calculate soil erosion in Pingtan Island. The module equation is as follows:

$$A = R * K * L * S * C * P * f, \quad (1)$$

where A - estimation of average annual soil loss ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$), R - rainfall erosion factor, ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot yr^{-1}$), K - soil erodibility factor ($t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$), LS - the combination of the slope steepness and slope length, C – the vegetation cover and management factor, P - soil and water conservation factor, F – 224.2 coefficient of the unit.

Potential soil erosion refers to the average annual soil loss without any vegetation cover, soil and water conservation measures ($C = 1, P = 1$)(Song et al., 2009):

$$A_p = R \cdot K \cdot LS \quad (2)$$

where A_p - annual soil potential loss ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$), R, K, LS - the same meaning as in Equation-1

Based on USLE model and data in table 1, the parameters at the regional scale could be calculated with the use of remote sensing and GIS (fig.1).

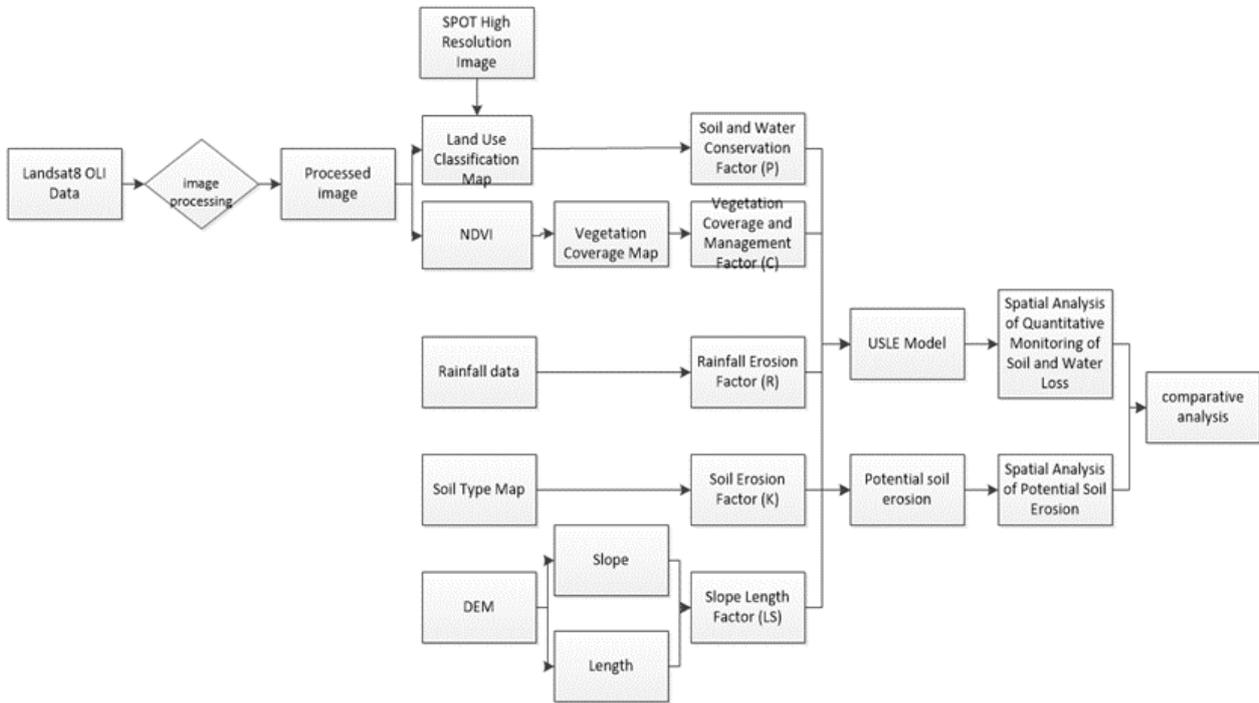


Fig. 1. Technical Roadmap for regional soil erosion calculation based on USLE module

3. Results and discussion

3.1. Results

3.1.1. USLE model parameters

(1) **Rainfall Erosion Factor.** Chinese scholars (Zhou et al., 1989) using the historical data observed in the Soil and Water Conservation Experimental Station to find the correlation coefficient between different rainfall parameters and combined forms of rain and soil loss, the paper established a set of soil erosion prediction equations for Fujian Province to provide rainfall erosion. In this paper, the historical rainfall data of Pingtan Island for four years (2006-2009) was downloaded from the Internet, and the four-year average annual rainfall R-value of this experiment was used: 213.427.

(2) **Soil Erosion Factors.** The cost of soil erosion factor represents the amount of soil loss of this type measured under the unit erosiveness index of rainfall per unit plot and the degree of soil sensitivity when erosion occurs (Cao et al., 2018). In this study, the K value of each soil type provided by the Pingtan project team is used to calculate the soil erosion factor.

(3) **Slope Length Factor.** Topography significantly affects soil erosion in the area. Among the topographic factors, the slope and slope length factor is one of the crucial factors affecting soil erosion. In this study, the slope factor is calculated using the segmentation method, the formula (McCool et al., 1987) is used for gentle slopes, and the method was recommended by Baoyuan et al. (1999). The slope length algorithm is calculated by the method proposed by Wischmeier (1959).

(4) **Vegetation cover and management factors.** In the study of Cai Chongfa (Cai et al., 1996) they established a functional relationship between the vegetation coverage factor C and the vegetation coverage VFC by studying the correlation between the slope sediment yield and vegetation coverage. Based on the remote sensing data of vegetation status in Pingtan Island, this paper obtains the vegetation coverage factor of the area.

(5) **Factors of soil and water conservation measures.** Based on the results of the previous studies, this study determined the P-factor values corresponding to each land-use type in Pingtan Island (fig. 2).

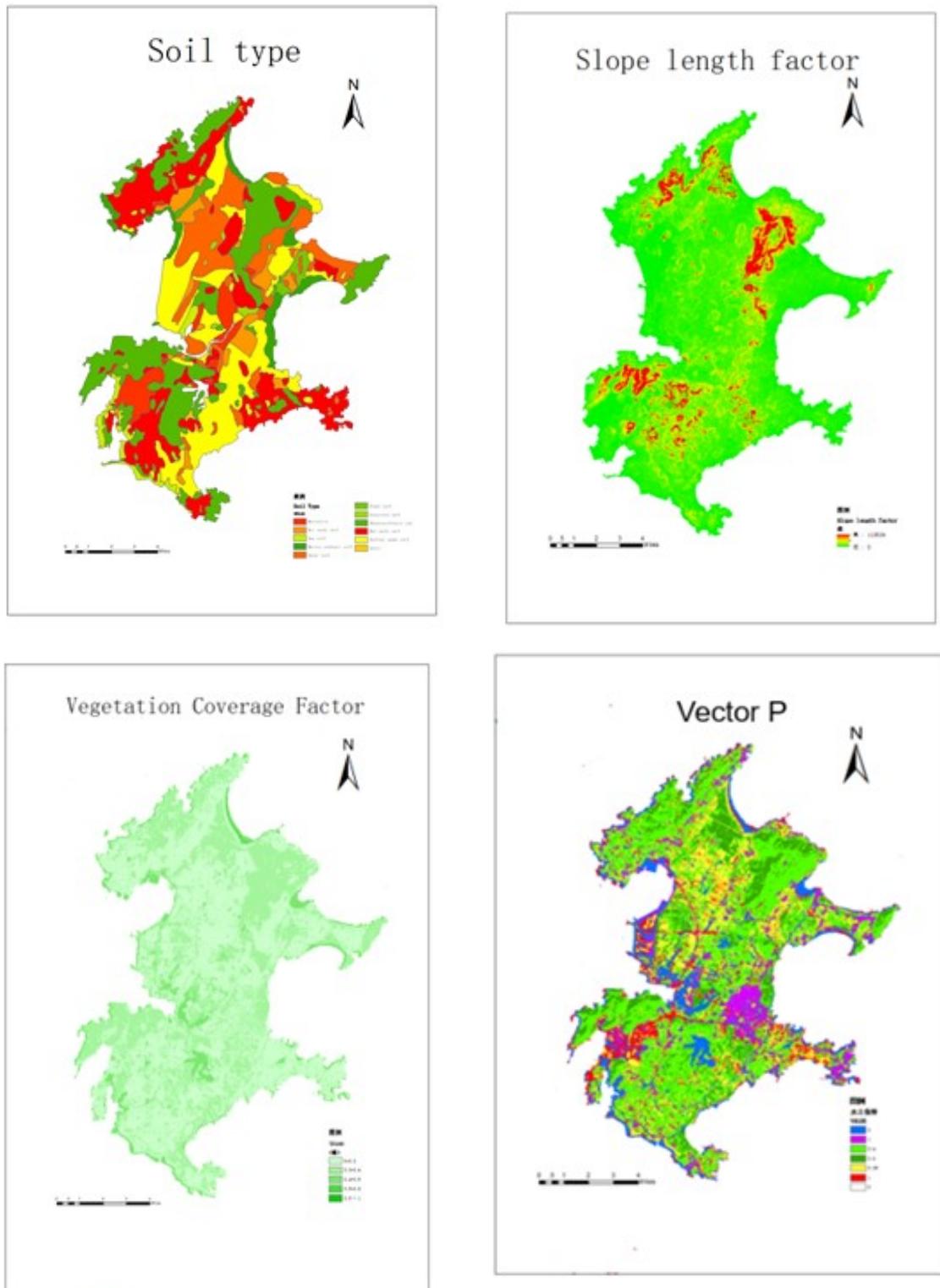


Fig. 2. Maps of the USLE parameters in Pingtan Island

3.1.2. Soil erosion estimation in Pingtan Island.

The five-factor layers described above were subjected to grid calculation, and the soil and water erosion intensity classification was graded by referring to the test results of soil erosion and the Classification Standard of Soil Erosion Classification (Zhijun et al., 2008) formulated by the Ministry of Water Resources of China in 2007. And we used it to get the distribution. The soil erosion intensity is divided into six levels, which are slight, mild, moderate, intensive, extreme intensive and severe (fig. 3).

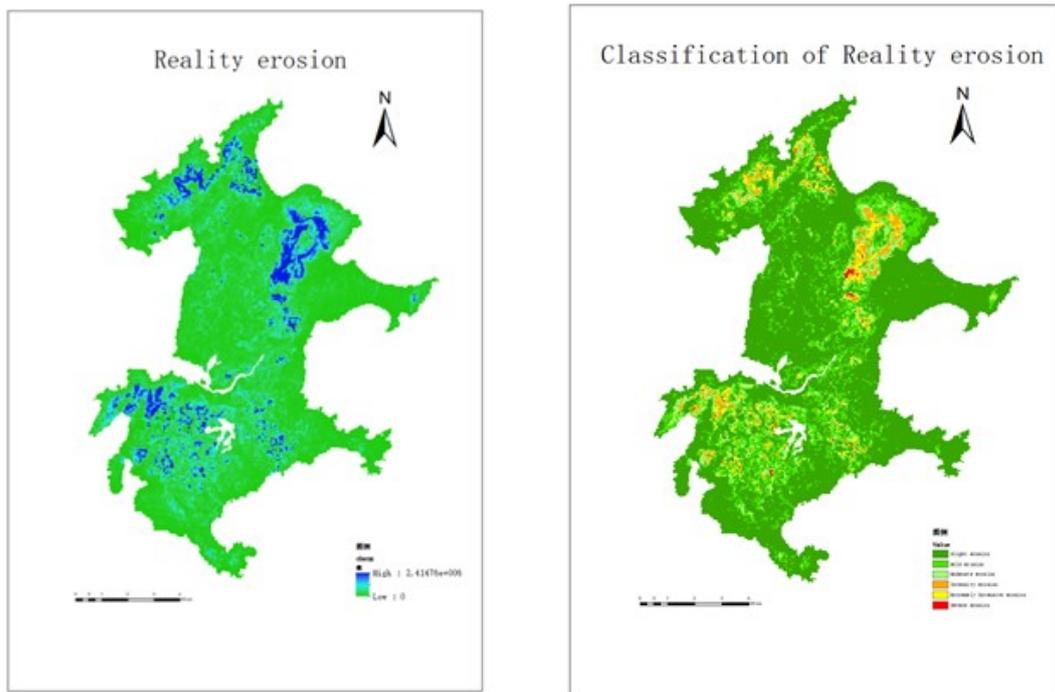
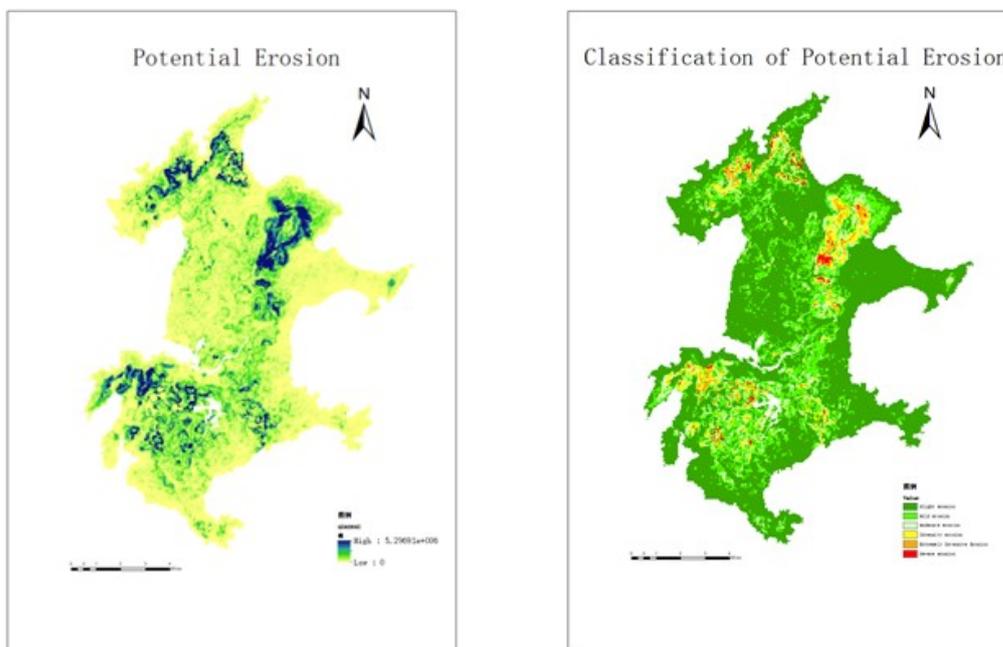


Fig.3. Results of soil erosion(A) estimation and classification in Pingtan island, China

3.1.3. Soil potential erosion estimation in Pingtan Island

With the support of GIS technology, each layer was multiplied using a grid calculator to obtain the spatial distribution map of potential soil erosion in Pingtan Island. The potential erosion intensity of the site was classified in the same way (fig. 4).



3.1.3. Soil erosion calculation by the use of the improved USLE model

This paper is based on the national soil erosion sensitivity distribution law proposed by the Ecological Environment Research Center of the Chinese Academy of Sciences (Song et al., 2009) and the previous analysis of the weight of each element of soil erosion in this study area (Guo et al., 2016). The impact criteria of various factors on soil erosion in the USLE model of the study area is

listed as follows: slope > vegetation coverage > rainfall erosivity > soil erosion > soil and water conservation measures. First, using yaaph10.1 (AHP program) hierarchy model of the software component we calculated the weights of each factor. The hierarchical graph was constructed and the influences of each element are presented in Fig.5.

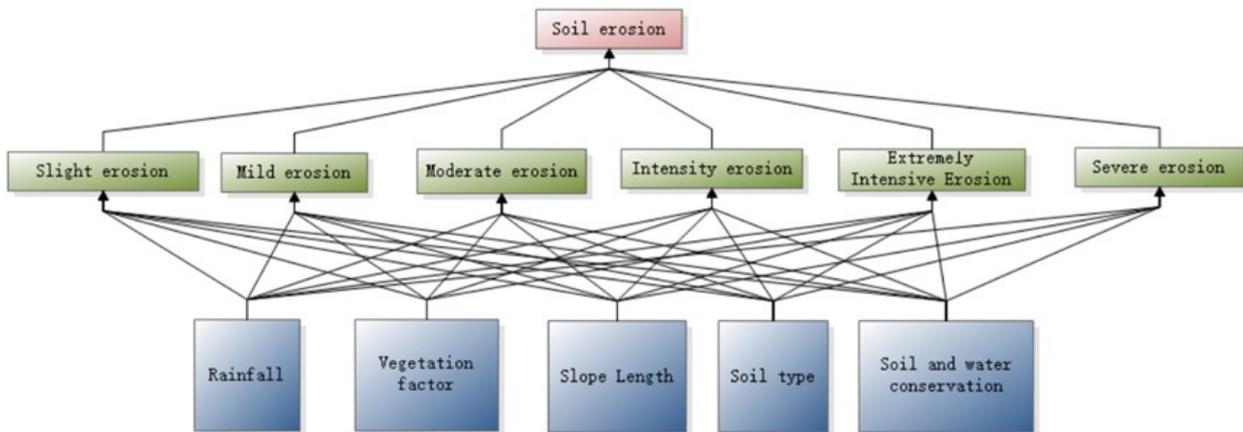


Fig.5. AHP model for soil erosion

Table 2

Weights of parameters in soil erosion AHP model

	R	C	P	LS	P
Weights	0.1222	0.2419	0.0855	0.5017	0.0487

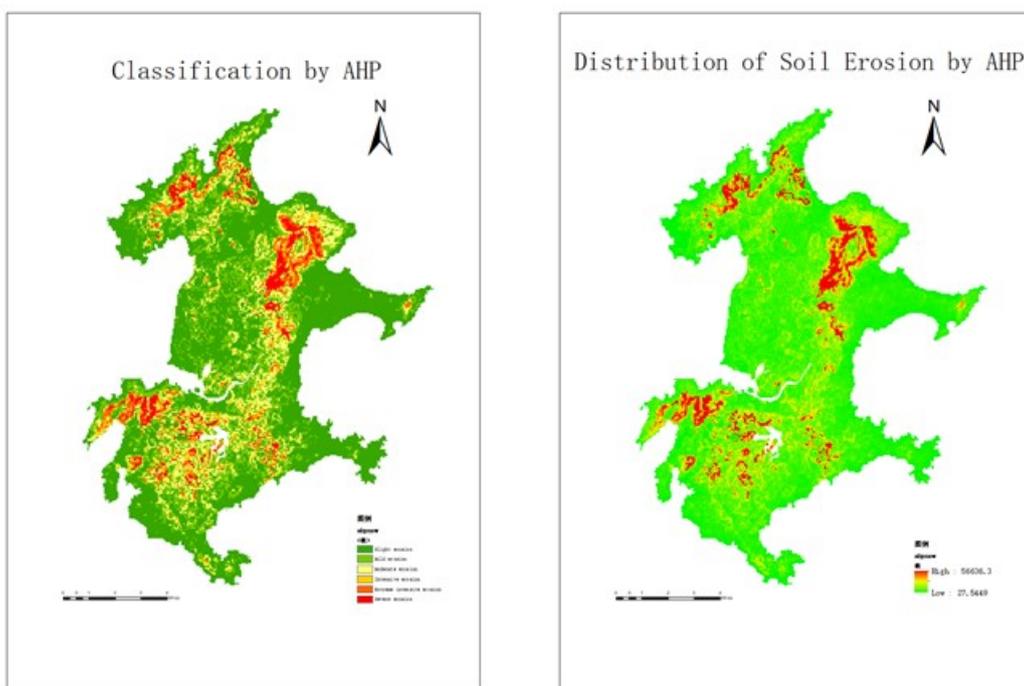


Fig.6. Soil erosion calculated with AHP model in Pingtan island, China

The weighted sum method was used to represent the model for evaluating the degree of soil erosion, and the soil erosion distribution map and grading map based on the improved USLE model in flat areas were obtained. It can be seen from figure 6 that soil erosion intensity distribution of the model for the area is roughly similar to the original. After field investigation. It was found that the improved model can better fit the local soil erosion situation.

3.2. Discussion

3.2.1. Influence of elevation on soil erosion

Pingtang island is a small coastal island centered on the county seat, and its landforms are dominated by low mountains and the sea plain. The terrain is even, the middle is slightly higher, there are single hills in the north and south, and the coast twists and turns. The highest altitude is Junshan in the northeast, with a height of about 425 m, and its overall elevation varies from 0-425 m. The elevation terrain in the county is not significant, and it can be divided into four levels after calculation.

Using the spatial analysis function of ArcGIS, the actual soil erosion map and potential soil erosion map obtained from the elevation map USLE model of Pingtang island were spatially superimposed to analyse different corresponding spatial distribution conditions at different elevation levels (Table 3-6).

Table 3

Comparing the proportion change of soil erosion (A) magnitude on different elevation level

Elevation	Proportion of soil erosion class						overall
	Slight	Mild	Moderate	Intensive	Extreme Intensive	Severe	
<200 m	71.93%	16.84%	6.13%	3.22%	1.59%	0.29%	100%
200-300 m	13.52%	42.30%	18.63%	20.83%	4.63%	0.10%	100%
300-400 m	99.41%	0.29%	0.11%	0.14%	0.04%	0.00%	100%
>400 m	0.00%	41.66%	20.10%	38.24%	0.00%	0.00%	100%

In table 3, the elevation of 0 – 200 m is dominated by slight and mild erosion classes, which occupy more than 90% of the area. The ranking on this elevation classification is slight > mild > moderate > intensive > extreme intensive > severe. Erosion on the 200 – 300 m elevation zone due to the gradual rise in altitude is slightly more severe than the previous level of soil erosion, mainly light and medium intensive, the sum of which accounts for more than 50% with a small amount of intensive erosion. The type of soil erosion on this elevation zone is mild > slight > moderate > slight > extreme intensive > intensive. Since there are not many highlands in the Pingtang area, the slight erosion is the most important in the elevation zone of 300 – 400 m, and the erosion intensity in this elevation zone is ranked as mild > intensive > moderate > extreme intensive > intensive. The erosion intensity on the elevation band above 400 m is mild > intensive > medium, and there is no slight, extreme intensive and severe erosion.

Table 4

Comparing the elevation distribution for each soil erosion (A) classes

Elevation	Soil Erosion class					
	Slight	Mild	Moderate	Intensive	Extreme intensive	Severe
< 200 m	49.80%	94.08%	93.09%	86.07%	93.00%	99.35%
200-300 m	0.18%	4.67%	5.60%	10.99%	5.37%	0.65%
300-400m	50.02%	1.20%	1.25%	2.72%	1.63%	0.00%
> 400 m	0.00%	0.05%	0.07%	0.23%	0.00%	0.00%
overall	100%	100%	100%	100%	100%	100%

In table 4, a larger proportion of soil erosion types are concentrated on the elevation of 0 – 200 m. As the height rises, the erosion phenomenon becomes more and more obvious, but it is still con-

centrated on the elevation section of 0 – 200 m. The 200 – 300 m elevation zone is dominated by intensive erosion. The proportion of erosion intensity is ranked as intensive > moderate > extreme intensive > mild > severe > slight. At the elevation zone of 300 – 400 m, the severe erosion gradually disappeared, and the slight erosion accounted for more than half. Due to the limitation of the area where the height exceeds 400 m under actual conditions, the proportion of the area on this elevation zone is small, which is consistent with the actual situation.

Table 5

Comparing the proportion change of soil potential erosion (A_p) magnitude on different elevation level

Elevation	Erosion type					
	Slight	Mild	Moderate	Intensive	Extreme Intensive	Severe
< 200 m	66.79%	19.45%	6.82%	4.02%	2.27%	0.65%
200-300 m	11.80%	38.49%	19.58%	19.50%	9.76%	0.86%
300-400 m	4.83%	42.00%	18.36%	15.02%	17.87%	1.91%
> 400 m	0.00%	23.94%	29.28%	16.00%	30.78%	0.00%

In table 5, the overall potential erosion intensity of Pingtan Island is mainly light erosion. From the table 5 it can be seen that in the elevation zone below 200 m the slight potential erosion will dominate, accounting for more than 50%. In the 200 – 300 m elevation zone, mild potential erosion will be the main type, and the proportion of the potential erosion types is ranked as mild > moderate > intensive > slight > extreme intensive > severe. In the elevation zone of 300 – 400 m the potential for slight erosion is still dominant, and the proportion of potential severe erosion has peaked at this elevation zone. The area of moderate potential erosion and extreme intensive potential erosion reached a peak on an elevation zone above 400 m. There was no severe potential erosion and slight potential erosion, and the potential erosion intensity of various types was relatively compromised.

Table 6

Comparing the elevation distribution for each soil erosion(A_p) classes

Elevation	Erosion type					
	Slight	Mild	Moderate	Intensive	Extreme Intensive	Severe
< 200 m	99.62%	95.34%	93.51%	89.88%	89.01%	96.17%
200-300 m	0.34%	3.66%	5.21%	8.46%	7.43%	2.49%
300-400 m	0.03%	0.97%	1.19%	1.58%	3.30%	1.34%
> 400 m	0.00%	0.03%	0.09%	0.08%	0.26%	0.00%

In Table 6 it can be concluded that as the height rises, the more obvious the soil loss phenomenon is, the more likely the potential soil erosion phenomenon will occur. The slight type of potential soil erosion in Pingtan Island is mainly concentrated on the 200m elevation zone, accounting for more than 90%. The potential soil erosion types in table 6 are all the largest in the area of elevation less than 200 m, which is consistent with the overall terrain of Pingtan Island. With the increase of height, the proportion of potential soil erosion types with medium and robust intensive is rising in the 200 – 300 m elevation zone, and severe erosion may occur. However, because of the limitation of the land area of the synthesis itself, even if the height is further increased, the proportion of the potential erosion area in the elevation above 300m has not changed significantly, which is consistent with the actual situation.

The changes of the six types of erosion intensity with the elevation are basically the same, all of which have a higher degree of difference between 200-300m, and then increase with height. Still, the difference of the potential erosion intensity is not so obvious, which is realistic. The amount of erosion is also corresponding. From the data provided in Table 6, it can be presumed that the trend of actual erosion and potential erosion is the same. The actual amount of soil erosion and potential amount of soil erosion in Pingtan area change significantly in the elevation zone of 200 – 300 m. The potential erosion intensity reached the expected peak in this interval. This data proves the inhibition effect of soil erosion by two factors (C and P). On the other hand, there is a large area of potential severe erosion on the elevation zone of 200 – 300 m. Still, it accounts for a small proportion in the actual soil erosion, which does not belong to the primary type of soil erosion. This proves that the elevation zone corresponds to this area. There is a high risk of severe soil erosion, and relevant areas should be paid particular attention to.

3.2.2. Impact of slope factors on soil erosion

ArcMap software was used to divide the soil erosion intensity of this area into six grades, and overlay the slope grade map of this area with the soil erosion intensity grade map to obtain the grade distribution of soil erosion with slope(see table 7). In Table7, it can be seen that soil erosion is closely connected with the slope. When slope is less than 8° , over 42.08% land percentage is slight erosion. With the slope is over 15° the percentage of intensive erosion grades has the priority proportion over 45.47%. Therefore, in Pingtan the slope has a robust positive effect on soil erosion, and 15° is the significant threshold point for the intensive erosion.

Table 7

Comparing the proportion change of soil erosion(A) magnitude on different slope levels

Slope	Slight	Mild	Moderate	Intensive	Extreme Intensive	Severe	overall
0-5°	76.58%	11.18%	8.05%	3.43%	0.70%	0.06%	100.00%
5-8°	42.08%	23.82%	21.05%	10.39%	2.38%	0.28%	100.00%
8-15°	13.43%	17.74%	43.02%	22.81%	2.74%	0.27%	100.01%
15-25°	4.21%	7.14%	33.88%	45.47%	9.05%	0.25%	100.00%
25-35°	4.47%	5.38%	27.62%	48.33%	13.53%	0.67%	100.00%
>35°	4.30%	5.23%	18.17%	57.23%	13.34%	1.72%	99.99%

In Table 7, the actual soil erosion situation is dominated by slight erosion in the slope zone of 0-5 degrees, the proportion of which has exceeded 70 %. It has the most significant percentage on this slope and the least percentage of severe erosion (less than 1%). The percentage of mild and moderate erosion on slopes of 5-8 degrees has reached more than 50%, and the percentage of severe erosion has increased (0.28%) but still has not reached 1%. On the slope band of 8-15 degrees, the percentage of moderate erosion is the largest, and the percentage of light erosion and intensive erosion reach about 20%; intensive erosion on the slope band of 15-25 degrees and 23-35 reached the maximum value, accounting for almost half of the proportion, indicating that these slope belts are mainly dominated by intensive erosion. The distribution of all types of erosion on slopes above 8 degrees is the same, with moderate erosion as the main type of erosion. The area of mild erosion continues to decrease, and the area of moderate, intensive, extreme intensive, and severe erosion continues to increase. On slopes more than 35 degrees, the area of severe erosion has reached the maximum, indicating that the soil erosion in this area is the most serious, which is consistent with the actual situation.

Table 8

Comparing the slope distribution for each soil erosion(A) classes

Slope	Slight	Mild	Moderate	Intensive	Extreme Intensive	Severe
0-5°	86.46%	58.17%	40.93%	29.01%	29.50%	30.37%
5-8°	11.77%	30.72%	26.52%	21.80%	24.69%	37.43%
8-15°	1.38%	8.41%	19.93%	17.59%	10.45%	12.93%
15-25°	0.25%	1.93%	8.93%	19.96%	19.68%	7.05%
25-35°	0.12%	0.66%	3.31%	9.65%	13.39%	8.46%
>35°	0.02%	0.11%	0.38%	1.99%	2.30%	3.77%

In Table 8, the slight erosion is mainly concentrated on the slope band of 0-5°, which accounts for more than 80%, far exceeding the other slope bands. Mild erosion is concentrated on the slope zone of 0-8 degrees, and the most prominent area is 5-8 degrees. The area occupied by moderate erosion is continuously increasing at 8-15 degrees, which is consistent with the conclusion that the higher the slope, the greater the degree of erosion. The intensive erosion is relatively concentrated at 5-35 degrees, and its total percentage accounts for more than 50%. In the intensive and extreme intensive erosion levels, the proportion of each level is relatively evenly distributed. Severe erosion peaks when the slope exceeds 35 degrees.

It can be presumed that as the slope continues to increase, the amount of slight erosion continues to decline, and the most insignificant and slightest erosion has the largest change on the slope band of 0-5 degrees. The moderate erosion is at 5-8 degrees. The change in the slope is the largest, but it tends to be gentle as the slope angle continues to increase. In order to investigate the reason for the slope, it is compared with the vegetation cover map and the terrain classification map. The research results prove that vegetation has a protective effect on soil and water. Intensive and severe erosion generally show an upward trend, and all have the most significant changes in the 8-15 degree zone. The zone is mainly for residential areas, indicating that human activities have a certain interference effect on soil erosion and will accelerate soil erosion. At the same time, the change in soil erosion intensity and above has slowed down at 15-25 degrees. This zone mainly corresponds to high vegetation cover areas, indicating that the higher the degree of vegetation, the better the effect of soil and water conservation, which can guide relevant departments to develop afforestation to prevent soil erosion.

Table 9

Comparing the proportion change of soil potential erosion (A_p) magnitude on each slope level

Slope	Slight	Mild	Moderate	Intensive	Extreme Intensive	Severe
0-5°	80.76%	16.61%	2.05%	0.39%	0.15%	0.04%
5-8°	50.45%	32.53%	12.57%	3.27%	0.97%	0.21%
8-15°	37.11%	23.20%	20.72%	12.75%	5.28%	0.94%
15-25°	28.92%	18.79%	12.95%	20.64%	14.26%	4.45%
25-35°	33.18%	20.45%	10.61%	8.03%	21.87%	5.86%
>35°	32.77%	28.06%	16.32%	5.33%	9.44%	8.08%

In Table 9, on the slope zone of 0-5 degrees, the slight potential erosion mainly accounts for more than 80%, and the severe potential erosion accounts for the least (0.04%) and less than 1%, indicating that soil occurs in the area. The probability of severe potential erosion is low. The area of slight potential erosion on the slope band of 5-8 degrees has a more significant change than that of 0-5 degrees, and it is second only to the slight potential erosion by 32.53%. The proportions of moderate potential erosion and intensity potential erosion also change greatly, especially the inten-

sive potential erosion changes from less than 1% to 3.27%; on the slope band of 8-15 degrees, the proportion of moderate potential erosion reaches the largest value. The proportions of potential erosion of intensity and potential erosion of extreme intensity have also increased significantly, 12.75% and 5.28%, respectively, which is consistent with the theory that the steeper the slope, the greater the risk of potential erosion. The potential intensity of erosion reached a peak on a slope of 15-25 degrees, and the extreme intensity and severe potential erosion also increased. This slope can be regarded as a watershed in which potential soil erosion occurs. On the 25-35 degree slope zone, the extreme intensity of potential land erosion has increased significantly, reaching its peak, occupying almost a fifth of the proportion. The severe potential erosion reaches its peak on slopes greater than 35 degrees, which is a high-incidence area of severe disasters, and needs sufficient attention. The distribution of all types of erosion in the above slope intervals is the same, with the slight potential erosion as the primary type of erosion, the area of mild potential erosion is continuously decreasing, and the area of moderate, intensive, extreme intensive and severe potential erosion is increasing.

Table 10

Comparing the slope distribution for each soil potential erosion(A_p) level

Slope	Slight	Mild	Moderate	Intensive	Extreme Intensive	Severe
0-5°	77.16%	52.10%	18.03%	5.65%	3.69%	4.27%
5-8°	10.46%	22.15%	23.96%	10.32%	5.26%	4.28%
8-15°	7.86%	16.14%	40.31%	41.13%	29.33%	19.77%
15-25°	3.66%	7.81%	15.05%	39.77%	47.34%	55.97%
25-35°	0.80%	1.63%	2.36%	2.96%	13.89%	14.11%
>35°	0.06%	0.18%	0.30%	0.16%	0.49%	1.59%

In Table 10, the area occupied by 0-5° is the largest under the slight potential erosion, occupying more than 70% of the area, and its proportion is ranked as 0-5° > 5-8° > 8-15° > 15-25°. It can be seen from the table that when the slope is 5-8°, the possibility of mild potential erosion is significantly increased; the possibility of moderate potential erosion on the slope of 8-15° is more significant, far exceeding the other types. The proportion of the slope interval, the area of moderate potential erosion on the slope above 35° is the smallest, less than 1% of the total potential erosion area. The potential erosion types of intensity are mainly distributed on two slope bands of 8-15° and 15-25°, and the probability of potential erosion is generally the same. Extreme intensity latent erosion accounts for nearly 50% of the 25-35 degree erosion zone, with a high probability of occurrence. It is most prone to severe potential erosion in the 15-25° zone, exceeding 50%, indicating that the area is most vulnerable to severe potential erosion disasters.

3.2.3. Soil Erosion and other impact factor

Increasing the vegetation coverage can effectively reduce soil erosion, vegetation can fix water and protect soil, and achieve better soil and water conservation effects. Using ArcMap software to superimpose and analyze land-use type map and the erosion intensity level map in the area, we can qualitatively see that the soil erosion intensity level distributions of different land types differ significantly. The effect of each land use type on soil erosion is ranked as bare land > medium and low vegetation cover area > arable land > building > water body > high vegetation cover area. It can be seen that when controlling soil erosion in Pingtan Island, bare land, low-medium vegetation coverage and cultivated land should be the critical areas for prevention and control.

4. Conclusion

Quantitative classification of soil erosion in Pingtan Island calculated using the USLE model. The most important types of erosion on the entire study area are slight and light soil erosion, which together account for nearly 3/4 of the total area. Among them, mild erosion accounts for almost half of the area under study, while moderate erosion takes only 1/4. Compared with the statistics of potential erosion, the type of slight erosion has the largest change, and the area has increased from potential 0 to half of the area under study. Secondly, the proportion of area with severe erosion has dropped from a potential 40% to nearly 4% in reality.

The overall type of soil erosion in Pingtan Island is mainly light erosion, with low intensive and extreme intensive types. The analysis of the two statistical results obtained below shows that the higher the elevation in Pingtan Island, the steeper the slope, the greater the intensity of soil erosion, and the greater the possibility of potential erosion.

In fact, the soil and water conservation conditions in Pingtan Island are good, and areas with severe soil erosion appear at 15-25° and slope intervals above 200 m. Although, no serious soil erosion has actually occurred in reality, it can be seen from the statistics of potential soil erosion that the areas with slopes above 25° and higher altitudes have the potential for severe soil erosion. The potential danger is extremely high. Departments should enhance monitoring and control of soil erosion in this area to prevent large-scale soil and water erosion disasters and reduce harm caused to people and the natural environment.

The vegetation coverage in the area is relatively high, and its water retention capacity is strong. When the vegetation coverage exceeds 45%, it is mainly dominated by slight erosion; intensive and severe erosions mainly occur in areas with vegetation coverage of less than 30%, and with the decrease of vegetation coverage, the erosion intensity will increase significantly. Under different soil types, soil erosion mainly occurs in dry sandy soil and red sandy soil, and the area of red soil erosion is the largest, which is consistent with the soil porosity of different soil types and its distribution location on Pingtan Island.

It is worthwhile to reasonably develop island eco-tourism resources, promote a virtuous cycle of island natural ecology, strengthen compulsory protection of ecological scenic spots, strictly prohibit development activities that do not meet functional positioning, and strengthen comprehensive prevention of soil erosion. Production and construction projects must strictly implement soil and water conservation schemes and systems to reduce damage to landforms and vegetation. From the difference between the potential and actual statistics of soil erosion, it can be seen that affecting vegetation coverage and soil and water conservation has played an important role in preventing large-scale soil erosion. These two factors affect the soil and water in Pingtan Island. The work of loss has laid the foundation, and the phenomenon of soil erosion can be more obviously controlled. Therefore, soil erosion disasters are most likely to occur in areas with high altitudes and steep slopes. In response to this situation, relevant departments should strengthen the work of mountain closure and reforestation, and promote the progress of returning farmland to forests in rural areas, so as to combine measures such as returning farmland, enclosure, and grazing bans to improve the vegetation coverage in these areas to maintain water and soil. At the same time, efforts have been made to strengthen artificial soil and water conservation. Relevant departments should increase the publicity of the legal system and raise the awareness of the public about protecting the environment. It is necessary that a variety of measures should be taken to comprehensively carry out macro and micro-level planning for the soil erosion area at the same time, reasonably maintain soil and water conservation in the area, and centrally and continuously control the soil erosion crisis in the area.

Using remote sensing, GIS technology and USLE model to select five factors affecting soil erosion as quantitative evaluation factors, integrate a set of evaluation techniques and methods, and calculate the factor value on this basis, estimate the soil erosion modulus. The grading of erosion

intensity has replaced the traditional methods of manual field survey and manual extraction of information to calculate soil erosion modulus. The results are more accurate and credible.

Since soil erosion is a complex geographic process, and its intensity has firm spatial heterogeneity, the spatial scale effect of soil erosion can be further analysed based on studying the intensity of soil erosion. With the development of intelligence, virtual reality technology, and remote sensing 3D visualization technology, the method of extracting water and soil erosion information based on knowledge discovery is the focus of future research.

The paper was supported by EU Erasmus+ project “GIS and Remote Sensing for Sustainable Forestry and Ecology (SUFÖGIS)”(598838-EPP-1-2018-EL-EPPKA2-CBHE-JP), “Innovation on Remote Sensing Education and Learning (IRSEL)”(586037-EPP-1-2017-1-HU-EPPKA2-CBHE-JP”, and Chinese MOST international cooperation program “ Using geospatial technology to monitor and assess the impact of land use / land cover change on Regional Ecological Security” (2018YFE0184300).

References

1. Baoyuan L., Keli Z., Juying J. Soil erosion and its application in erosion forecasting, *Journal of Natural Resources*, 1999, No. 04, pp. 54-59.
2. Chongfa C., Shuwen D. Study on surface characteristics and its effect on slope erosion of red soils derived from granite, *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, No.4, pp.111-115.
3. Chongfa C., Shu-wen D., Zhihu S., Li H.A., Guang-yuan Z. Study of Applying USLE and Geographical Information System IDRISI to Predict Soil Erosion in Small Watershed, *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, Vol.14, No.2, pp.19-24.
4. Fujian Z., Minghua C., Fuxing L., Qiaofan L., Yonghuan C. Preliminary Discussion on Rainfall Erosivity Index of Fujian Province, *Fujian Soil and Water Conservation*, 1989, Vol. 02, pp.58-60.
5. Guo J., Yixiong H. Ecosystem vulnerability assessment of Pingtan Island based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation, *Protection Forest Science and Technology*, 2016, No. 9, pp. 18-21.
6. McCool D.K., Brown L.C., Foster G.R., Mutchler C.K., Meyer L.D. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation, *Transactions of the ASAE*, 1987, Vol. 30, No. 5, pp. 1387-1396.
7. Ming L., Henggui W. Discussion on soil erosion in Pingtan and its prevention measures, *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2013, Vol.25, No.04, pp. 59-62.
8. Sheng C., Mengyun O., Weijun Z., Xuelan T., Pei L., Jie T. Quantitative evaluation of soil erosion in Ningxiang city based on GIS and USLE, *Journal of China Agricultural University*, 2018, Vol. 23, No.12, pp. 149-157.
9. Song G., Shiyan Z. Improved method of USLE model based on GIS and RS on the Loess Plateau, *Geospatial Information*, 2009, Vol. 7, No. 2, pp. 48-50.
10. Wang X., Zhiyun O., Han X., Hong M., Bojie F. Study on the distribution and zoning of soil erosion sensitivity in China, *Acta Ecologica Sinica*, 2001, No. 1, pp. 14-19.
11. Wischmeier W.H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation, *Soil Science Society Proceedings*, 1959, Vol. 23, pp. 246-249.
12. Yong S., Shuqiao S., Shuying S. Research on calculation methods of various factors of USLE equation based on GIS, *Modern Agricultural Science and Technology*, 2013, Vol. 1, pp. 206-207.
13. Yueqing X., Xiaomei S. Calculation of Soil Erosion Based on GIS and RUSLE: A Case Study of Maotiao River Basin in Guizhou Province, *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, No. 4, pp. 67-71.
14. Zhijun L., Yaolin L. Study on the Relationship between Vegetation Coverage and Soil Erosion Based on RS and GIS: Taking Zigui County in the Three Gorges Reservoir as an Example, *Science and Technology Management of Land and Resources*, 2008, Vol.25, No.3, pp.6-10.

СОДЕРЖАНИЕ

Шалаев В.С. Сборник «Лесные экосистемы в условиях изменения климата»: результаты первого десятилетия.....	6
Гончаров Е.А., Булыгина Н.А., Кухтенко Н.А. Динамика климатических показателей города Йошкар-Олы.....	12
Демаков Ю.П., Нуреева Т.В., Краснов В.Г., Иванов А.В. Производительность 40-летних культур сосны разной исходной густоты.....	22
Терехин Э.А. Нарушенность хвойных лесов лесостепной зоны Центрального Черноземья в начале XXI века.....	33
Мухортов Д.И., Антропова А.В. Рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной в контейнерах при использовании субстратов различной плотности сложения.....	42
Исяньюлова Р.Р., Ишбирдина Л.М., Габделхаков А.К. Динамики таксономического состава и спектра жизненных форм флоры лесопарка им. Лесоводов Башкортостана в условиях изменения климата.....	54
Мальков Ю.Г. Видовое разнообразие орнитофауны, не отнесенной к объектам охоты, в лесных биотопах Республики Марий Эл как фактор стабильности лесных экосистем.....	63
Кусакин А.В., Ефимова Т.Н., Шведова Т.Е. Эффективность осушения болота «Куплангское» Республики Марий Эл.....	72
Рыбаков К.В., Краснов В.Г., Смышляева М.И. Приживаемость и рост опытных культур дуба черешчатого (<i>Quercus robur</i> L.), созданных сеянцами с закрытой корневой системой, выращенных на различных питательных субстратах.....	81
Тарасова Л.В., Зорина А.С. Возможности дистанционного зондирования для мониторинга водоохранных лесов.....	93
Рахматуллин З.З., Рахматуллина И.Р., Габделхаков А.К., Мартынова М.В., Султанова Р.Р. Динамика NDVI растительного покрова лесопарка им. Лесоводов Башкирии.....	104
Али М.С. Спектральная делимость классов наземного покрова мухафаза Латакия Сирийской Арабской Республики по данным спутника Sentinel-2.....	114
Лежнин С.А., Музурова Р.Л. Оценка вторичной сукцессии на залежах Республики Марий Эл.....	126
Tianyue X., Jinming S., Xiaomei L. Monitoring soil erosion by use of remote sensing and GIS technology in the subtropical island, Pingtan, China.....	136

CONTENTS

Shalaev V.S. “Forest ecosystems under climate change”: first decade results.....	6
Goncharov E.A., Bulygina N.A., Kukhtenko N.A. Dynamics of climate indicators in Yoshkar-Ola.....	12
Demakov Yu.P., Nureeva T.V., Krasnov V.G., Ivanov A.V. Productivity of 40-year-old pine plantations of different original density.....	22
Terekhin E.A. Disturbance of coniferous forest in the forest-steppe zone of Russia at the beginning of the XXI century.....	33
Mukhortov D.I., Antropova A.V. Growth and development of the containerized seedlings of scots pine using the substrates of various bulk density.....	42
Isyanyulova R.R., Ishbirdina L.M., Gabdelhakov A.K. The dynamics of taxonomic composition and spectrum of vital forms in Bashkortostan urban forest in the conditions of climate change.....	54
Malkov Iu.G. Species diversity of nongame ornithological fauna in forest biotopes of Mari El Republic as a key to sustainability of forest ecosystems.....	63
Kusakin A.V., Efimova T.N., Shvedova T.E. The efficiency of dryinghe swamp Kupanskoe of the Republic of Mari El.....	72
Rybakov K.V., Krasnov V.G., Smyshlyaeva M.I. Survival ability and growth of experimental english oak (<i>Quercus robur</i> L.) composed of seedlings with closed root system grown in different nutritious substrates.....	81
Tarasova L.V., Zorina A.S. Remote sensing for monitoring water-conservation forests..	93
Rakhmatullin Z.Z., Rakhmatullina I.R., Gabdelkhakov A.K., Martynova M.V., Sultanova R.R. NDVI dynamics of vegetation cover in Bashkortostan urban forest.....	104
Ali M.S. Spectral separability of land cover classes of Latakia province of the Syrian Arab Republic with the use of Sentinel-2.....	114
Lezhnin S.A., Muzurova R.L. Estimation of secondary succession on the abandoned agricultural lands in Mari El Republic.....	126
Tianyue X., Jinming S., Xiaomei L. Monitoring soil erosion by use of remote sensing and GIS technology in the subtropical island, Pingtan, China.....	136

Научное издание

**ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА:
БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ**

Международный сборник научных статей

Редактор *Л. С. Емельянова*
Компьютерная верстка *С. А. Лежнин*
Переводчик *М. Н. Курдюмова*

Подписано к использованию *25.12.2019*

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

Редакционно-издательский отдел ПГТУ
424006 Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17

Центр устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов
424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3