ISSN 2500-4263

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

Сборник научных статей

FOREST ECOSYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGE:
BIOLOGICAL PRODUCTIVITY AND REMOTE MONITORING

International Compendium of research papers

Йошкар-Ола
2016

ISSN 2500-4263

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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

Сборник научных статей

FOREST ECOSYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGE:

BIOLOGICAL PRODUCTIVITY AND REMOTE MONITORING

International Compendium of research papers

Йошкар-Ола
2016

УДК 630
ББК 43:20.18
Л 50

Редакционная коллегия:

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

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

С. И. Чумаченко, д-р.б.н., профессор, Московский государственный университет леса

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

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

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

Dr. Sha Jinming, Professor, Director of China-Europe Center for Environment and Landscape Management

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

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

Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность
Л 50 **и дистанционный мониторинг:** сборник научных статей / отв. ред. проф. Э.А. Курбанов [Электронный ресурс]. − Электрон. дан.− Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2016. − 204 с. − URL: https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/

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.

УДК 630
ББК 43:20.18

ISSN 2500-4263

© Поволжский государственный технологический университет, 2016
© Центр устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов, 2016

UDC 630
BBK 43:20.18
L 50

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, Moscow State Forest 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
Dr. Ioannis Gitas, Associate 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, Counsil for Geoscience
Dr. Jinliang Wang, Professor, College of Tourism & Geographic Sciences, Yunnan Normal University

Forest ecosystems under climate change: biological productivity and remote monitoring :
L 50 compendium of research papers / Executive editor Prof. E.A. Kurbanov [Electronic resource]. − Electronic data − Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2016. − 203 c. − 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 scientific expertise between research staff of universities and research organizations.

UDC 630
BBK 43:20.18

ISSN 2500-4263

© Volga State University of Technology, 2016
© Center of Sustainable forest management and Remote sensing , 2016

ACKNOWLEDGEMENT

The Jean Monnet center of Excellence ―European Expertise and Technology for Environmental Protection and Sustainable Forestry‖ at Volga State University of Technology has been funded with sup-port 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) получил финансовую поддержку Европейского Союза. Этот сборник опубликован в рамках деятельности центра SUFEX. Содержание сборника отражает точку зрения только их авторов. Исполнительное агентство по вопросам образования, аудиовизуальной деятельности и культуры и Европейская Комиссия не несут ответственности за любое использование информации, содержащейся в этой публикации.

GIS BASED MODELLING OF SPATIALLY DISTRIBUTED DIRECT RUNOFF AND INFILTRATION IN THE KOSH REGION OF SOUTH AFRICA USING RINSPE HYDROLOGIC MODEL

Abraham Thomas
Council for Geoscience, Private Bag X112, Pretoria 0001, South Africa.
Email: athomas@geoscience.org.za; athomas1965@gmail.com

Abstract: *This study presents the estimated amount of rainfall leaving the KOSH (Klerksdorp-Orkney-Stilfontein-Hartebeestfontein) region as direct runoff (surface runoff or overland flow) as well as the amount of rainfall entering into the subsurface as infiltration (as part of these waters may contribute to the water ingress and polluted drainage in the waste rock dumps / abandoned or closed mines) using the RINSPE (Runoff, Infiltration and Non-point Source Pollution Estimation) model implemented in ArcView GIS 3.3. The direct runoff and infiltration depths and their total volumes were calculated by the model for four scenarios using the National Land-Cover (NLC) Dataset of 2013-14, long-term average annual rainfall and hydrologic soil groups derived from the Land Type data. Scenarios 1 and 2 used 25 mm uniform rainfall to predict the expected direct runoff and infiltration at any location in the study area for average (AMC II) and dry (AMC I) Antecedent Moisture Conditions; scenarios 3 & 4 used annual rainfall and assumed 50 rainfall events in a year for AMCII & AMCI. Scenarios 1 and 2 show that direct runoff and infiltration are respectively 9.16 % & 64.33 % and 4.7% & 68.79% of the total rainfall. With a 25 mm uniform rainfall, for average moisture condition (AMC II), the total volumes of direct runoff and infiltration produced are 6.311 million cubic meters (MCM) and 44.316 MCM respectively whereas for dry antecedent moisture condition (AMC I) the total volumes of direct runoff and infiltration produced are 3.24 MCM and 47.387 MCM respectively. Scenario 3 (AMC II using annual rainfall) predicted a total infiltration of 256.189 MCM (16.44% of the total rainfall); the total direct runoff predicted for AMC II is 389.264 MCM (24.98% of the total rainfall) whereas the scenario of AMC I gave much lower direct runoff (281.430 MCM or 18.06% of the total rainfall) and higher infiltration (365.264 MCM or 23.44% of the total rainfall). Summarized volumes (zonal statistics) of rainfall, initial loss, infiltration and runoff for the leased areas of the mines of KOSH region were also calculated. Later, a simulation of accumulated runoff volume for each scenario was carried out using the runoff volume distribution grid and a depression-free digital elevation model (DEM) prepared from a 30 m SRTM elevation grid. The accumulated direct runoff volumes simulated at the point where the Vaal River exits the study area for the four scenarios are respectively 5.17 MCM, 2.695 MCM, 314.271 MCM and 230.568 MCM. Spatially distributed direct runoff and infiltration maps will help to understand the amount of rainfall leaving different surface areas including mining areas as runoff carrying certain type of pollutants and the amount of rain water infiltrating into the subsurface horizons, which may later contribute to water ingress or appear as part of the polluted mine drainage formed in the study area.*

Keywords: *KOSH region; ArcView GIS; Direct Runoff; Infiltration; GIS Modelling; RINSPE Model.*

Introduction

Gold mining operations in the KOSH (Klerksdorp-Orkney-Stilfontein-Hartebeestfontein) region have caused the contamination of the ground and surface water resources of the area, including the Vaal River. The water quality in the Vaal River has been deteriorating over time as a result of various human activities such as industrial, mining and agricultural operations (Ochse, 2007; SAVE, 2013). The mining processes/activities may impact on the natural hydrologic system by disturbing the integrity of the overlying rocks and soil strata, resulting in increased infiltration and recharge of the groundwater system in places (eWISA, year unknown). Surface runoff and water infiltrating into the ground (forming potential recharge) are sources of mine water ingress. The predictions of runoff and infiltration will help in understanding the amount of water leaving the area and the

amount of water entering the subsurface as recharge. An accurate assessment of the volume of runoff and infiltration taking place in a given catchment area is critical in understanding the volume of polluted surface water as well as the extent to which the infiltrated water forms part of the groundwater regime in the catchment area. Therefore, an effort was made to estimate the amount of the runoff and infiltration taking place in the KOSH region through spatially distributed hydrologic modelling.

The main objective / goal was to apply spatially distributed hydrologic modelling in order to provide estimates of infiltration and surface runoff from a single rainfall event and from annual rainfall data at any point in the KOSH region and accumulated runoff appearing as a component of the stream flow in the river system. The results obtained from this study would help to know how much of the surface and infiltrated water may be polluted as a result of mine water drainage.

Characteristics of the KOSH region

The study area identified for this modelling work covers the main towns Klerksdorp, Orkney, Stilfontein and Hartebeestfontein of North West Province of South Africa. The KOSH region is located approximately 160 km southwest of Johannesburg (Figure 1). The Vaal River flows through the south-eastern part of the KOSH region. The majority of the KOSH area has a sandy loam soil texture with an undulating relief, whereas the relief of the region south of Orkney is flat (Midgley et al., 1994). The KOSH region forms part of the Witwatersrand gold mining region, including the Far East, Central Rand, Western and Far West basins and the Free State gold mines, and which is at serious risk from acid mine drainage (Mail & Guardian, 2014).

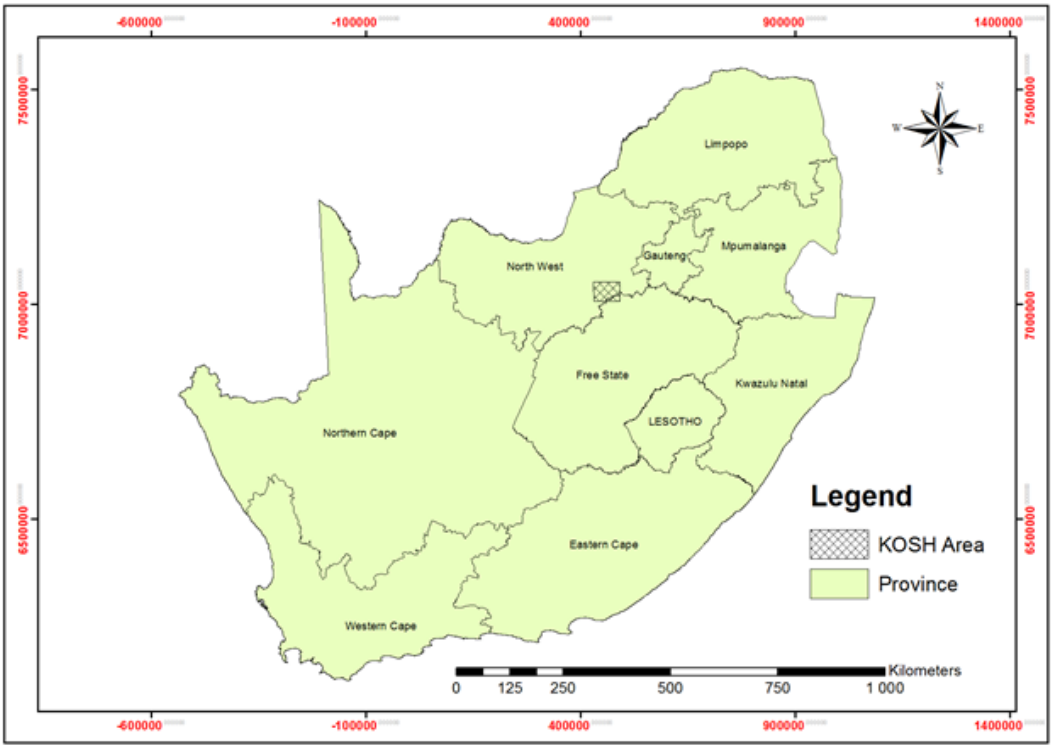


Fig. 1. Locality map of the KOSH area.

Method used for modelling

The surface runoff and infiltration in any location may be estimated by means of the following equation: *Surface runoff = rainfall – initial abstraction – infiltration.* The USDA NRCS Curve Number (CN) method is an empirical description of infiltration and rainfall excess. The surface runoff and infiltration in any location may be estimated by means of the following equation: *Surface runoff = rainfall – initial abstraction – infiltration.* The USDA NRCS Curve Number (CN) method is an

empirical description of infiltration and rainfall excess. The CN method combines infiltration with initial abstraction or initial losses (losses attributable to interception, initial infiltration and detention / surface storage) to estimate the rainfall excess, which appears as runoff. The method is empirically based and is applicable to the situation in which amounts of rainfall, runoff, and infiltration are of interest (US EPA, 1998).

The CN method predicts direct surface runoff (Q) using the following equation:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad , \tag{1}$$

in which: Q – total rainfall excess (runoff) for storm event (inches), P – total rainfall for the storm event (inches), Ia – total initial loss or "initial abstraction" (inches), S – potential maximum retention capacity of the soil at the beginning of the storm or maximum amount of water that will be absorbed after the runoff begins (inches).

The following relation relates the value of S to the CN:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad , \tag{2}$$

CN – runoff CN (0–100, based on the soil and land use information). CN for AMC I were computed from those for AMC II using the following equation:

$$CN_I = CN_{II} / (2.3 - 0.013\ CN_{II}) \quad , \tag{3}$$

where CN_I is the CN for AMC I and CN_{II} is the CN for AMC II.

Hydrologic Model and Data Used

After examining the available GIS-based hydrologic models, the RINSPE (Runoff, Infiltration and Non-Point Source Pollution Estimation) hydrologic model of Thomas et al. (2009) that implemented the NRCS CN Method in ArcView GIS (ver. 3.3) by means of Avenue programming was selected for the estimation of surface runoff and infiltration. RINPSE is an event-based/annual-based model designed to estimate runoff and infiltration (using the NRCS CN method) and the pollutant loading from different land cover types within a catchment. The term "runoff" predicted by this model using the CN method refers to surface runoff or direct surface runoff from rainfall only and does not incorporate other components of runoff to streams such as return flow, interflow and base flow from groundwater. The RINSPE model requires inputs of land use/land cover, soil, annual- or event-based rainfall data, the event mean concentration (EMC) of the pollutants to be investigated and the DEM. The model is capable of generating estimates of cumulative infiltration, quantity and quality of distributed and accumulated runoff and pollutant loading from the catchment for a given storm event or annual rainfall. Datasets such as the NLC (National Land Cover) dataset of year 2013–14 (Figure 2), Land Type data (for preparing hydrologic soil group map (Figure 3) based on soil texture extraction), long-term annual rainfall data having1 km resolution (Figure 4) and SRTM elevation (30 m resolution) were used in this modelling work. Land use/land cover distribution is shown in Figure 2; the total identified area of extent for the KOSH region is 2 757 km^2. The dataset covering the KOSH region only has 53 classes of the possible 72 classes of the whole dataset and the major land use/land cover categories observed are:

1) Grassland (59.11%),
2) Cultivated comm fields (low): 20.13%,
3) Low shrubland (5.46%),
4) Cultivated comm fields (med): 2.97%,
5) Thicket/dense bush (2.06%),
6) Mines 1 bare (1.29%), and
7) Woodland/open bush (1.14%).

The other categories of land use/land cover units include wetlands, urban townships and residential areas. The land types "mines 2 semibare" and "water bodies (water permanent)" occupy less than 1% of the total area identified for the modelling work.

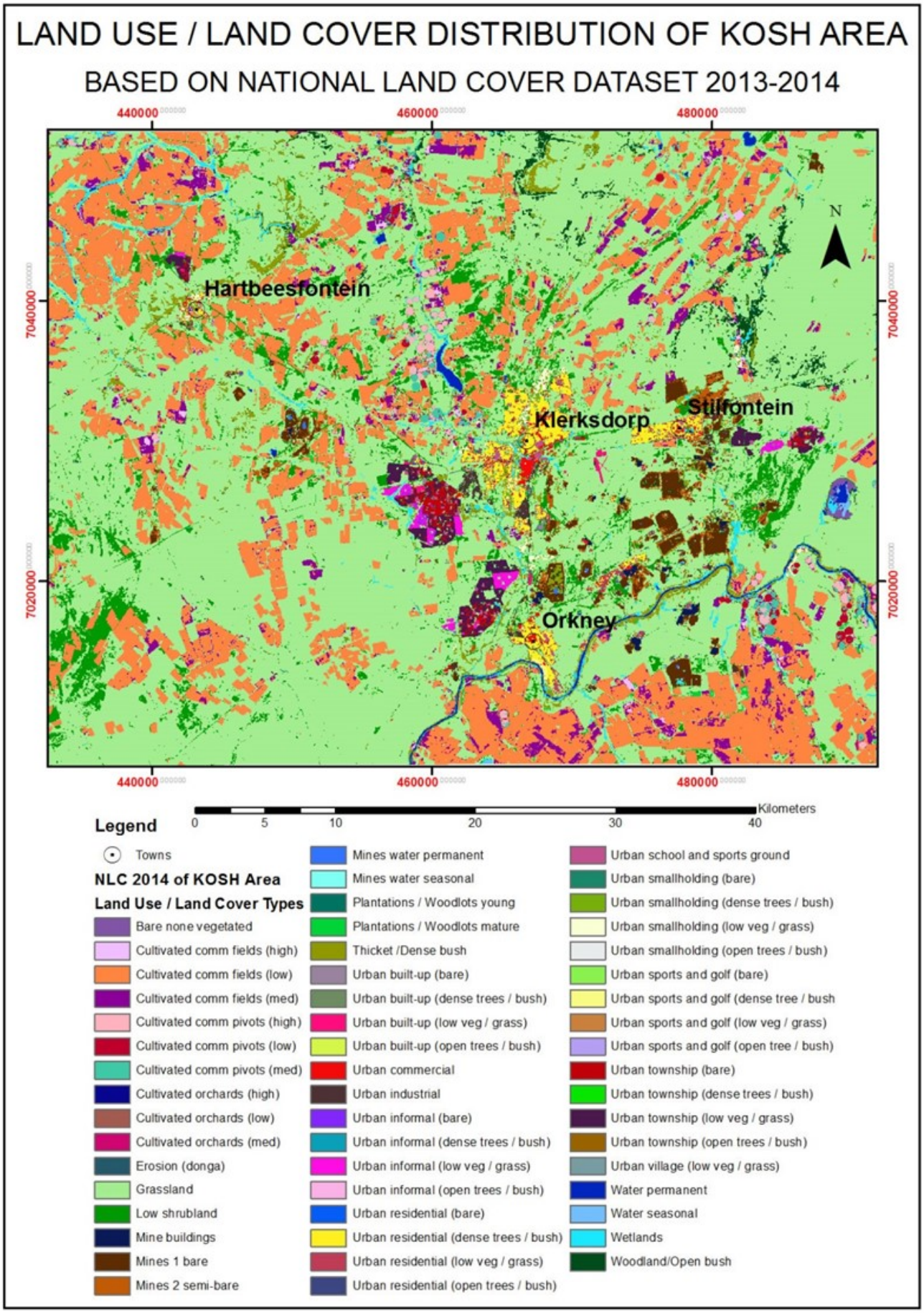


Fig. 2. Land use/land cover map of the KOSH area based on NLC 2013–14.

The modelling was done for the following four scenarios:

- Scenario 1: using CN for AMC II & 25 mm uniform rainfall.
- Scenario 2: using CN for AMC I & 25 mm uniform rainfall.
- Scenario 3: using long-term annual rainfall & CN for AMC II (average runoff) and 50 rainfall events for the whole year.
- Scenario 4: using long-term annual rainfall & CN for AMC I (lowest runoff) and 50 rainfall events for the whole year.

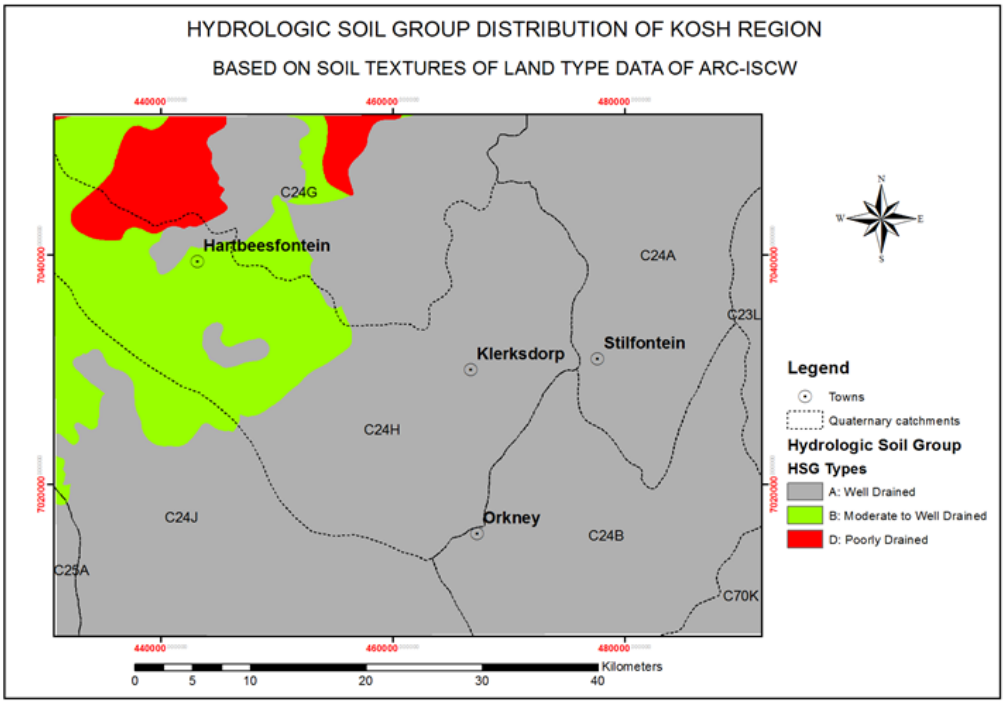


Fig. 3. Hydrologic soil group distribution map of the KOSH area based on land type data

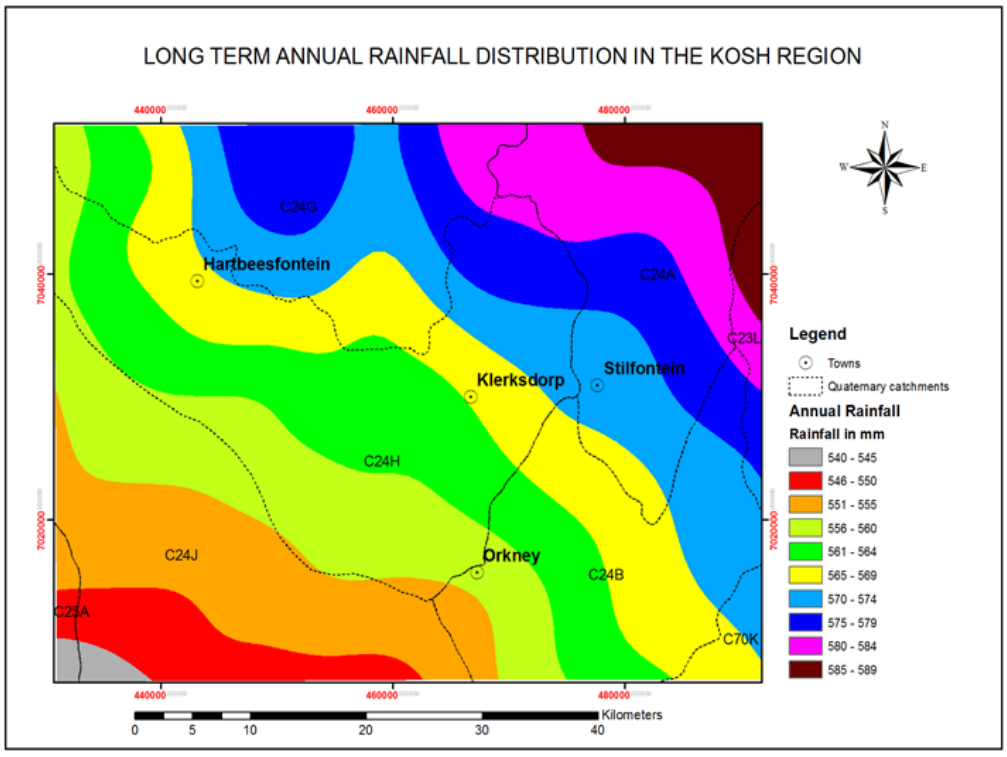


Fig. 4. Long-term annual rainfall distribution map of the KOSH area

Results and Discussion

The results obtained from this hydrologic modelling for four different scenarios are shown in Figures 5 to 9 and summarized volumes in Tables 1 to 4. Table 1 shows the assigned Ia and CN and values for AMC II under different HSG and land use/land cover combinations. The spatial distribution of the infiltration values appears very similar to the spatial distribution of the CN values identified on the land cover and HSGs. Scenarios 1 and 2 show that direct runoff and infiltration are respectively 9.16 % & 64.33 % and 4.7% & 68.79% of the total rainfall. With a 25 mm uniform rainfall, for AMC II, the total volumes of direct runoff and infiltration produced are 6.311 million cubic meters (MCM) and 44.316 MCM respectively whereas for AMC I the total volumes of direct runoff and infiltration produced are 3.24 MCM and 47.387 MCM respectively.

Table 1

Land use/land cover classes of the KOSH area based on NLC 2014, assigned CNs and initial loss (Ia) values

Code	Land Use / Land Cover (NLC 2014)	Area (m^2)	% Area	I_a (mm)	NRCS Curve Nun	
					CN-HSG-A	CN-HSG-B
1	Water seasonal	1 230 300	0,045	0	100	100
2	Water permanent	10 392 300	0,377	0	100	100
3	Wetlands	27 170 100	0,986	3,5	78	78
5	Thicket /Dense bush	56 707 200	2,057	8,5	32	58
6	Woodlan/Open bush	31 380 300	1,138	8	36	60
7	Grassland	1 629 775 800	59,113	7,5	49	69
9	Low shrubland	150 482 700	5,458	8,5	35	56
10	Cultivated comm fields (high)	6 659 100	0,242	5,5	65	77
11	Cultivated comm fields (med)	82 071 900	2,977	5	67	78
12	Cultivated comm fields (low)	555 048 000	20,132	4,5	69	80
13	Cultivated comm pivots (high)	10 401 300	0,377	5	67	78
14	Cultivated comm pivots (med)	9 725 400	0,353	4,5	69	80
15	Cultivated comm pivots (low)	7 182 900	0,261	4	72	81
16	Cultivated orchards (high)	37 800	0,001	5,5	45	66
17	Cultivated orchards (med)	279 000	0,010	5	48	67
18	Cultivated orchards (low)	103 500	0,004	4,5	51	68
32	Plantations / Woodlots mature	10 427 400	0,378	10	30	55
33	Plantation / Woodlots young	77 400	0,003	8	36	60
35	Mines 1 bare	35 436 600	1,285	4,5	77	86
36	Mines 2 semi-bare	18 671 400	0,677	5	68	79
37	Mines water seasonal	187 200	0,007	0	100	100
38	Mines water permanent	612 900	0,022	0	100	100
39	Mine buildings	3 656 700	0,133	3	89	92
40	Erosion (donga)	60 300	0,002	2,5	77	86
41	Bare none vegetated	4 542 300	0,165	2,5	77	86
42	Urban commercial	8 528 400	0,309	3	89	92
43	Urban industrial	8 096 400	0,294	3,5	81	88
44	Urban informal (dense trees / bush)	41 400	0,002	6	89	92
45	Urban informal (open trees / bush)	56 700	0,002	5,5	89	92
46	Urban informal (low veg / grass)	6 662 700	0,242	5	89	92
47	Urban informal (bare)	725 400	0,026	3	89	92
48	Urban residential (dense trees / bush)	26 893 800	0,976	6	77	85
49	Urban residential (open trees / bush)	1 373 400	0,050	5,5	77	85
50	Urban residential (low veg / grass)	8 413 200	0,305	5	77	85
51	Urban residential (bare)	725 400	0,026	3	77	85
52	Urban school and sports ground	3 148 200	0,114	3,5	61	75
53	Urban smallholding (dense trees / bush	2 709 000	0,098	5,5	54	70
54	Urban smallholding (open trees / bush	441 000	0,016	5	54	70
55	Urban smallholding (low veg / grass)	4 379 400	0,159	3	54	70
56	Urban smallholding (bare)	131 400	0,005	3,5	54	70
57	Urban sports and golf (dense tree / bus	1 277 100	0,046	5,5	51	68
58	Urban sports and golf (open tree / bush	135 000	0,005	5	51	68
59	Urban sports and golf (low veg / grass)	1 681 200	0,061	3	51	68
60	Urban sports and golf (bare)	109 800	0,004	3,5	51	68

Table 2

Summarised volumes of rainfall, initial loss, infiltration and runoff for the KOSH area (AMC II; 25 mm uniform rainfall)

Land Use / Land Cover (NLC 2014)	Code	Area (m^2)	% Area	Rainfall Vol (m^3)	Initial Loss Vol (m^3)
Bare none vegetated	41	4542300	0,165	113557,50	11355,75
Cultivated comm fields (high)	10	6659100	0,242	166477,50	36625,05
Cultivated comm fields (low)	12	554713200	20,132	13867830,00	2496209,40
Cultivated comm fields (med)	11	81976500	2,977	2049412,50	409882,50
Cultivated comm pivots (high)	13	10400400	0,377	260010,00	52002,00
Cultivated comm pivots (low)	15	7182900	0,261	179572,50	28731,60
Cultivated comm pivots (med)	14	9716400	0,353	242910,00	43723,80
Cultivated orchards (high)	16	37800	0,001	945,00	207,90
Cultivated orchards (low)	18	103500	0,004	2587,50	465,75
Cultivated orchards (med)	17	279000	0,010	6975,00	1395,00
Erosion (donga)	40	60300	0,002	1507,50	150,75
Grassland	7	1628874900	59,113	40721872,50	12216561,75
Low shrubland	9	150434100	5,458	3760852,50	1278689,85
Mine buildings	39	3656700	0,133	91417,50	10970,10
Mines 1 bare	35	35436600	1,285	885915,00	159464,70
Mines 2 semi-bare	36	18671400	0,677	466785,00	93357,00
Mines water permanent	38	612900	0,022	15322,50	0,00
Mines water seasonal	37	187200	0,007	4680,00	0,00
Plantation / Woodlots young	33	77400	0,003	1935,00	619,20
Plantations / Woodlots mature	32	10426500	0,378	260662,50	104265,00
Thicket /Dense bush	5	56673900	2,057	1416847,50	481728,15
Urban built-up (bare)	72	1208700	0,044	30217,50	3626,10
Urban built-up (dense trees / bush)	69	53100	0,002	1327,50	318,60
Urban built-up (low veg / grass)	71	1606500	0,058	40162,50	8032,50
Urban built-up (open trees / bush)	70	20700	0,001	517,50	113,85
Urban commercial	42	8528400	0,309	213210,00	25585,20
Urban industrial	43	8096400	0,294	202410,00	28337,40
Urban informal (bare)	47	725400	0,026	18135,00	2176,20
Urban informal (dense trees / bush)	44	41400	0,002	1035,00	248,40
Urban informal (low veg / grass)	46	6662700	0,242	166567,50	33313,50
Urban informal (open trees / bush)	45	56700	0,002	1417,50	311,85
Urban residential (bare)	51	725400	0,026	18135,00	2176,20
Urban residential (dense trees / bush)	48	26893800	0,976	672345,00	161362,80
Urban residential (low veg / grass)	50	8413200	0,305	210330,00	42066,00
Urban residential (open trees / bush)	49	1373400	0,050	34335,00	7553,70
Urban school and sports ground	52	3148200	0,114	78705,00	11018,70
Urban smallholding (bare)	56	131400	0,005	3285,00	459,90
Urban smallholding (dense trees / bush)	53	2709000	0,098	67725,00	14899,50
Urban smallholding (low veg / grass)	55	4379400	0,159	109485,00	13138,20

Figure 5 shows that high infiltration values (17.5 to 20.2 mm for AMC II and 19.6 to 21.2 mm for AMC I) are observed in certain patches north of Orkney owing to the presence of land use/land cover: Urban small holding (low veg/grass), Urban residential (dense trees/bush) on HSG A; south-east, north and south of Klerksdorp owing to the presence of land use/land cover: Urban smallholding (low veg/grass), Urban residential (dense trees/bush) on HSG A; southeast, north and south of Klerksdorp owing to the presence of land use/land cover: Urban school and sports ground, Urban smallholding (low veg/grass), Urban residential (dense trees/bush) and Urban sports and golf (dense tree/bush) on HSG A and northeast of Stilfontein owing to the presence of land use/land cover: Woodland/Open bush on HSG A.

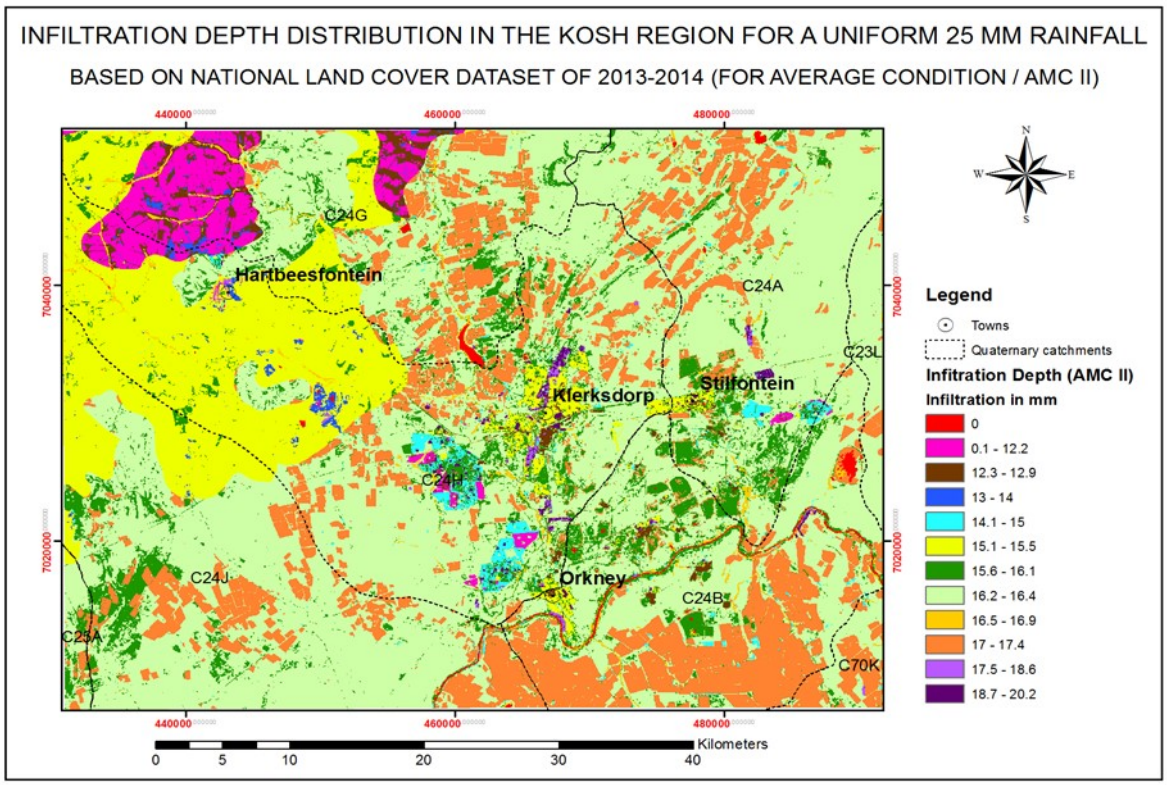


Fig. 5. Infiltration depth distribution in the KOSH region for a 25 mm rainfall event (average conditions)

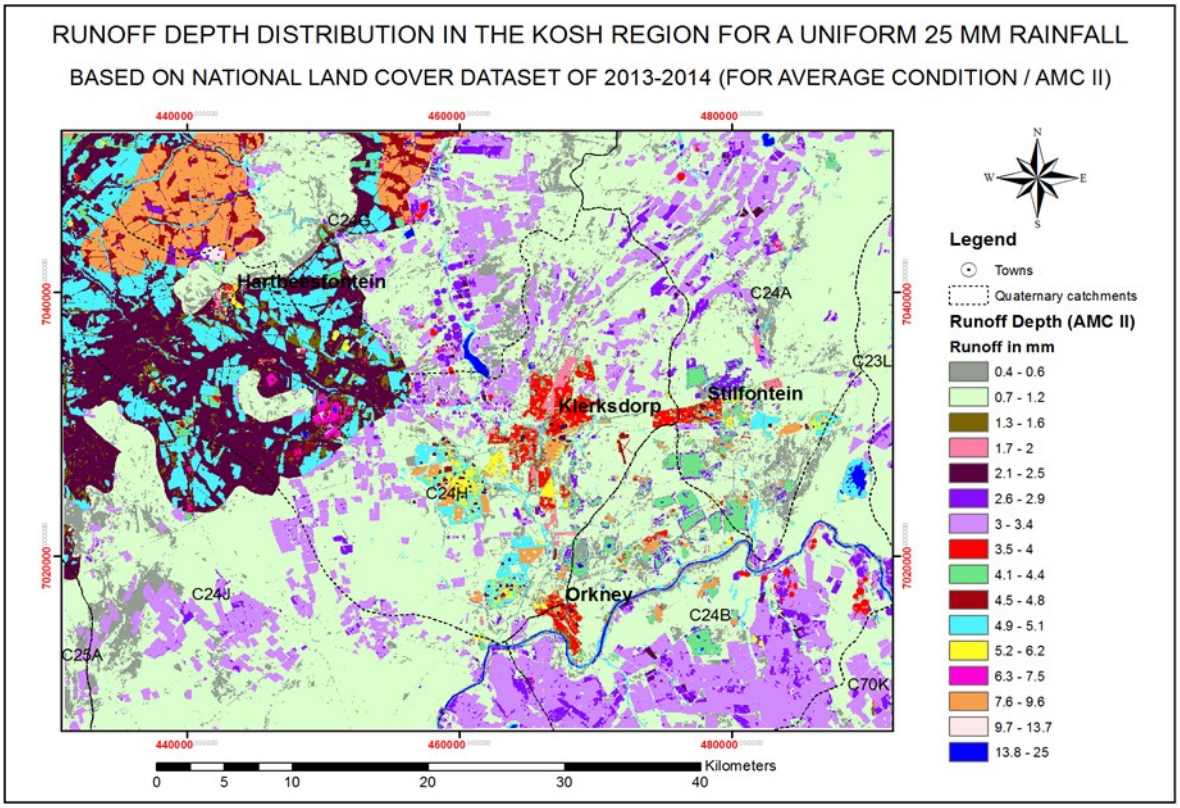


Fig. 6. Surface runoff depth distribution in the KOSH region for a 25 mm rainfall event (average conditions)

Table 3

Summarised results of hydrologic modelling using RINSPE model for four different scenarios in the KOSH region

Hydrologic Parameters	Scenario 1: One Inch (25 mm) Uniform Rainfall; AMC II	Scenario 2: One Inch (25 mm) Uniform Rainfall; AMC I	Scenario 3: Using Annual Rainfall (50 rainfall events in a year;	Scenario 4: Using Annual Rainfall (50 rainfall events in a year;
Study Area (km^2)	2 755,53	2 755,53	2 755,53	2 755,53
Rainfall Vol (Mm^3)	68,89	68,89	1 558,50	1 558,50
Initial Loss Vol (Mm^3)	18,26	18,26	913,04	913,04
Infiltration Vol (Mm^3)	44,32	47,39	256,19	365,26
Surface Runoff Vol (Mm^3)	6,31	3,24	**389,26**	**281,43**
Rainfall Depth (mm)	25,00	25,00	565,59	565,59
Ave. Initial Loss (mm)	6,63	6,63	331,35	331,35
Ave. Infiltration (mm)	16,08	17,20	92,97	132,56
Ave. Surface Runoff (mm)	2,29	1,18	141,27	102,13
Initial Loss (% of Rainfall)	26,51%	26,51%	58,58%	58,58%
Infiltration (% of Rainfall)	64,33%	68,79%	16,44%	23,44%
Surface Runoff (% of Rainfall)	9,16%	4,70%	24,98%	18,06%

The total volume of annual rainfall received in the KOSH region is 1,558.498 MCM. For scenario 3 (AMC II), the average annual initial abstraction of the KOSH region for 50 rainfall events is 58.58% of the total rainfall (913.044 MCM). For a mean annual rainfall of 565.59mm, the mean initial loss predicted by the model is 331.35 mm; mean infiltration is 92.97 mm and the mean peak surface runoff is 141.27 mm. Scenario 3 predicted a total infiltration of 256.189 MCM (16.44% of the total rainfall); the total direct runoff predicted for AMC II is 389.264 MCM (24.98% of the total rainfall) whereas the scenario of AMC I gave much lower direct runoff (281.430 MCM or 18.06% of the total rainfall) and higher infiltration (365.264 MCM or 23.44% of the total rainfall).

Estimation of volumes for the leased mining areas

A polygon shapefile showing the extent of the lease areas of 11 mines of the KOSH region (Figure 8) was superimposed over the grids showing annual volumes of rainfall, initial loss, runoff and infiltration for average moisture conditions (AMC II) and summarized volumes (zonal statistics) of these parameters for the leased areas of the mines of KOSH region were calculated (Table 4) using the Summarise Zones program of ArcView Spatial Analyst Extension.

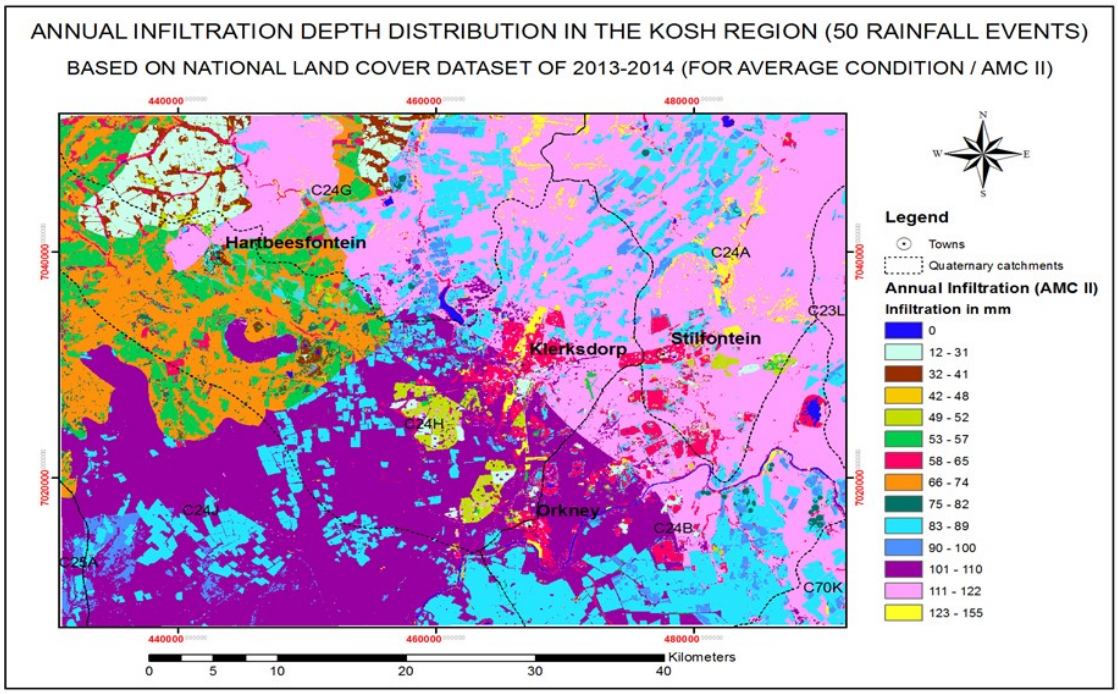


Fig. 7. Annual infiltration depth distribution in the KOSH region for 50 rainfall events (average conditions)

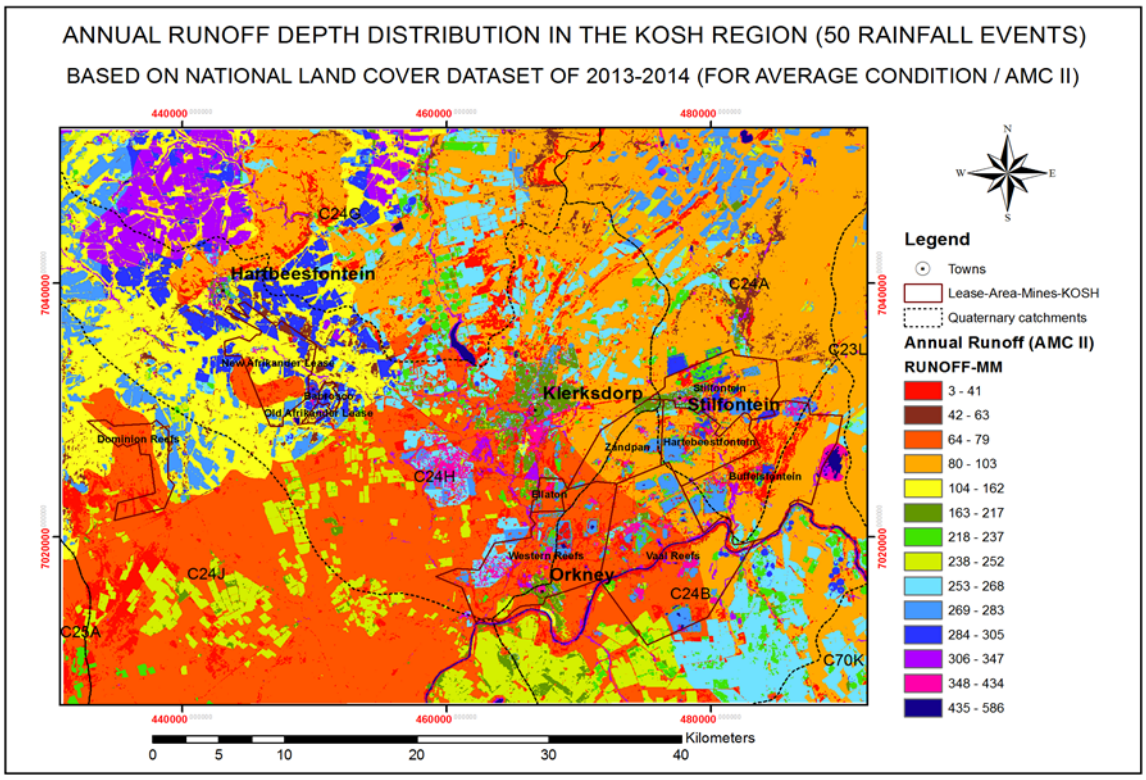


Fig. 8. Annual direct runoff depth distribution in the KOSH region for 50 rainfall events (average conditions)

Table 4

Summarised annual volumes of rainfall, initial loss, runoff and infiltration for average moisture conditions (AMC II) extracted for the leased areas of mines of the KOSH region

MINE	Area (m^2)	Annual Volumes (m^3) of Rainfall, Initial Loss and Runoff & In Moisture Condition for the Leased Mine Areas of K		
		Rainfall Volume (m^3)	Initial Loss Volume (m^3)	Runoff Volume (m^3)
Babrosco	2 526 300	1 419 141,6	732 892,5	550 958,3
Buffelsfontein	71 569 800	40 906 180,0	24 904 216,0	8 711 294,0
Dominion Reefs	18 881 100	10 493 374,0	6 938 730,0	1 786 866,9
Ellaton	5 463 000	3 070 424,8	1 769 602,5	764 408,9
Hartebeestfontein	29 747 700	16 965 880,0	10 169 280,0	3 849 336,0
New Afrikander Lease	35 073 900	19 773 490,0	11 936 272,0	5 222 207,5
Old Afrikander Lease	1 847 700	1 035 472,5	571 545,0	343 679,9
Stilfontein	36 568 800	20 964 274,0	11 919 600,0	5 527 250,5
Vaal Reefs	97 534 800	55 041 084,0	32 268 668,0	13 373 343,0

Runoff flow accumulation

The accumulated surface runoff was estimated using a depression-free DEM, applying the flow direction and flow accumulation commands and using the runoff volume distribution grid as the weight grid. The submenu Accumulated Surface Runoff Volume, under the menu NPS (non-point source) Pollution Modelling, was used to generate the accumulated surface runoff volume. When running this program of runoff accumulation, a flow direction grid was first generated from the DEM by calculating the downstream flow path of water leaving each cell. Flow direction was determined by evaluating the relative elevation of the eight cells surrounding the cell in question. The neighboring cell with the least elevation was identified as the direction of outflow from the current cell. The value of the current cell in the output flow direction grid was assigned based on the value

of the cell into which it flows. Then a flow accumulation grid was created based on the flow direction grid and was used to derive a stream network (Figure 9).

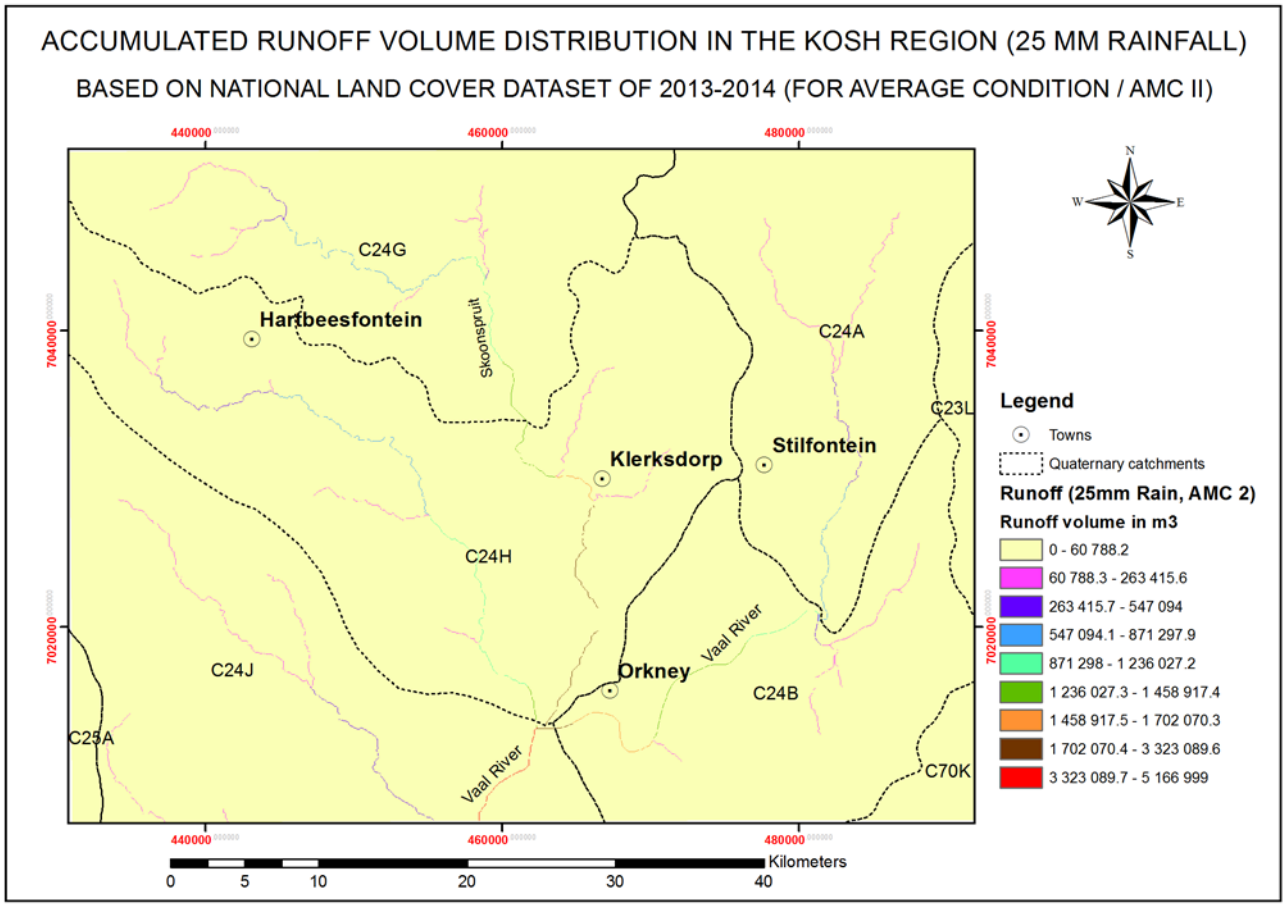


Fig. 9. Accumulated runoff volume distribution in the KOSH region for a 25 mm rainfall event (AMC II)

The accumulated direct runoff volume simulated at the point where the Vaal River exits the study area of KOSH region (Figure 9) for Scenario 1 (AMC II and 25 mm uniform rainfall event) is 5.17 MCM (7.5% of the total rainfall of 68.89 MCM). For this scenario, the total direct runoff volume predicted for the whole modelled area is 6.31 MCM and some parts of the runoff (forming other tributaries) do not reach the exit point of the Vaal River, but do reach a point further down from the study area (Figure 9). For Scenario 2 (AMC I and a 25 mm uniform rainfall event), the accumulated direct runoff volume simulated at the point where the Vaal River exits the study area of the KOSH region is 2.695 MCM (3.91% of the total rainfall of 68.89 MCM). For this scenario, the total direct runoff volume predicted for the modelled area is 3.24 MCM. For Scenarios 3 and 4, when considering the annual rainfall (AMC II & I) for 50 rainfall events, the accumulated direct runoff volume amounts simulated at the point where the Vaal River exits the study area of the KOSH region are 314.271 MCM (20.16% of the total rainfall of 1558.498 MCM) and 230.568 MCM (14.79% of the total rainfall of 1558.498 MCM). These accumulated runoff volume figures are the expected accumulated surface runoff values in ideal conditions where there is no abstraction of river water for irrigation or interruption of flow as a result of man-made ponding or dams (e.g. the Vaal dam in the upstream).

Conclusions

Runoff and infiltration generally represent the responses of different land use/land cover units to precipitation and also reflect the integrated effects of a wide range of parameters such as catchment, climate and precipitation characteristics. The RINSPE model could be used successfully to estimate

the surface runoff, cumulative infiltration and accumulated runoff in the KOSH region area for four different scenarios (dry and average antecedent moisture conditions using a 25 mm uniform rainfall distribution and spatially varying the long-term average rainfall distribution) using the 2014 NLC data, land type data and SRTM elevation. Model simulations of dry conditions show high infiltration volumes and low runoff volumes compared with average conditions. The maps showing the results for the simulation of 25 mm uniform rainfall are useful in estimating the expected runoff and infiltration at any point in the study area during such rainfall. The maps showing the spatial distribution of runoff and infiltration for the different scenarios are very useful in understanding the expected total volumes and depths of water observed as runoff and infiltration at any location in the study area. Spatially distributed direct runoff and infiltration maps will help to understand the amount of rainfall leaving different surface areas including mining areas as runoff carrying certain type of pollutants and the amount of rain water infiltrating into the subsurface horizons, which may later contribute to water ingress or appear as part of the polluted mine drainage formed in the study area.

Modelled results show that the distribution of surface runoff and infiltration is fully dependent on the rainfall distribution and the nature of the land use/land cover types underlain by different types of hydrologic soil groups. The runoff predicted by the RINSPE model represents the quick flow component of runoff and includes the sum of channel precipitation and surface runoff (overland flow) direct surface runoff and does not include the contribution of interflow from the catchment that forms part of surface runoff as return flow or discharge (base flow) from the groundwater as part of the total flow in a river.

The author would like to thank the Department of Environmental Affairs (DEA) for providing the 2013–2014 South African National Land Cover dataset and the Institute for Soil, Climate and Water of the Agricultural Research Council (ARC) in Pretoria for providing other spatial datasets (viz. Land Type data and long term annual rainfall).

References

1. OCHSE, E. 2007. Seasonal rainfall influences on main pollutants in the Vaal River Barrage Reservoir: a temporal spatial perspective. Minor Dissertation for the M.A. Degree in Environmental Management, University of Johannesburg. South Africa. https://ujdigispace.uj.ac.za/bitstream/handle/10210/2467/minor_dissertation_estie_ochse_final.pdf?sequence=1 .

2. MAIL & GUARDIAN. 2014. Former mine owners to cough up. 17 January 2014.

3. http://mg.co.za/article/2014-01-17-00-former-mine-owners-to-cough-up . Accessed on 3 November 2015.

4. MIDGLEY, D.C., PITMAN, W.V. and MIDDLETON, B.J. 1994. Surface water resources of South Africa 1990. Book of Maps, Volume II. Drainage Region C Vaal, 1st Edition 1994. Report 298/2.2/94. Water Research Commission, South Africa. 1994.

5. SAVE THE VAAL ENVIRONMENT (SAVE). 2013. Problems We Face: Water Quality. http://www.save.org.za/content/water-quality . Accessed on 3 November 2015.

6. THOMAS, A., CHINGOMBE. W., AYUK, J. and SCHEEPERS, T. 2009. A comprehensive investigation of the Kuils–Eerste River catchments water pollution and development of a catchment sustainability plan. Report to the Water Research Commission. December 2009. Report No. 1692/1/10.

7. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). 1998. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: application of selected mathematical models. Volume II. EPA/600/R-87/128b, February 1998. United States Environmental Protection Agency.

8. WATER INSTITUTE OF SOUTHERN AFRICA (eWISA). Year unknown. The Olifants River Limpopo / Mpumalanga Province. E-Book of the Water Institute of Southern Africa (WISA). 1st Floor, 5 Constantia Park 546, 16th Road, Midrand. Gauteng, South Africa. http://www.ewisa.co.za/misc/School/eBOOK_PDFs/oLIFANTS%20COVER.pdf

LAND CHANGE DETECTION BASED ON OBJECT-BASED MULTI-SOURCE REMOTE SENSING IMAGES

JI Jian-Wan, Sha Jin-Min, Li Xin-Tong
College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: *Based on Terra ASTER image in 2001, GF-1 PMS image in 2013 and other auxiliary data such as Google Earth image of Longxiang island area, this paper builds up extraction rules of each class using the object-based classification method, extracts wetland and non-wetland information of Longxiang island area and conducts wetland change detection of Longxiang island area based on eCognition software. At last, this paper makes area conversion matrix and area convertible rate matrix of wetland and non-wetland information based on Excel software. The result shows that: (1) The overall classification accuracy of Terra ASTER image in 2001 is 87.42%, Kappa coefficient is 0.84; The overall classification accuracy of GF-1 PMS image in 2013 is 90.72%, Kappa coefficient is 0.87. (2) From 2001 to 2013, the total wetland area decreases on 4.05% and the decreased area is 1.1 km^2. The total natural wetland area, which includes permanent river and shallows, decreases 1.65% and the decreased area is 0.42 km^2. The total artificial wetland area, which includes freshwater aquaculture farms and agricultural ponds, decreases on 39.76% and the decreased area is 0.68 km^2; In addition, the total non-wetland area increases on 4.71% and the increased area is 1.1 km^2. (3) From 2001 to 2013, the internal changes of artificial wetland and natural wetland appear different situation. In natural wetland, there is about 3.888 km^2 shallows which turns to permanent river, and the major change area is located in the southeast and northwest of Longxiang island area. However, in artificial wetland, there is about 0.663 km^2 freshwater aquaculture farms and 0.41 km^2 agricultural ponds which turn into non-wetland and the major change area is located in the Longxiang island and the southwest of the study area. The acceleration of human society and production process is the main reason causes the drastic changes of artificial wetland.*

Keywords: *object-based classification; remote sensing; Longxiang Island area; wetland; change detection.*

1. Introduction

Wetlands are formed by the complex interaction of water and land, and as a whole, which is one of nature's ecological landscape rich of biodiversity and the most important human living environment. It has so many obvious ecological functions such as flood storage and drought prevention, maintaining water resources, water purification, maintaining biodiversity, regulating climate and beautifying environment (Töyrä and Pietroniro, 2005; Coppin *et al.*, 2004; Yuan and Lu, 2004). Remote sensing technology has become an important way of wetlands detection with its low cost and high efficiency characters (Li *et al.*, 2007). Currently, a variety of traditional classification methods including maximum likelihood, minimum distance, unsupervised classification etc. have been widely applied in wetland information extraction from remote images, however, these traditional classification methods all use pixel as basic unit. In addition, because indexes which participate in information extraction include the pixel's spectral information, using traditional classification methods make the classification results exist obvious "salt and pepper" effect. Different from these traditional classification methods, object-based classification method not only takes image's spectral characters into consideration, but also applies image's texture characters to complete image segmentation and image classification. What's more, object-based classification result avoids speckle noise which makes the classification result have good integrity (Mo *et al.*, 2012; Wang and Bao, 2004; Jia *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2012).

This paper aims to use multi-source remote sensing images to extract wetland and non-wetland information of Longxiang island area based on the object-based classification module of eCognition

software and to provide a scientific decision-making basis for protecting and managing Longxiang island area's wetlands according to timely grasp wetland and non-wetland information changes of Longxiang island area.

2. Study area

Longxiang island and nearby area is located in 28º58'N, 119º19'E (Figure 1), southeast of Minhou county, Fuzhou city. It covers approximately 50.49 km^2. The main land cover types of Longxiang island area is permanent river, shoals, freshwater aquaculture farms, agricultural ponds and arable lands, especially in Longxiang island, there are existing so many rivers which not only provide conditions for freshwater aquaculture but also provide good protection for crops irrigation in the island.

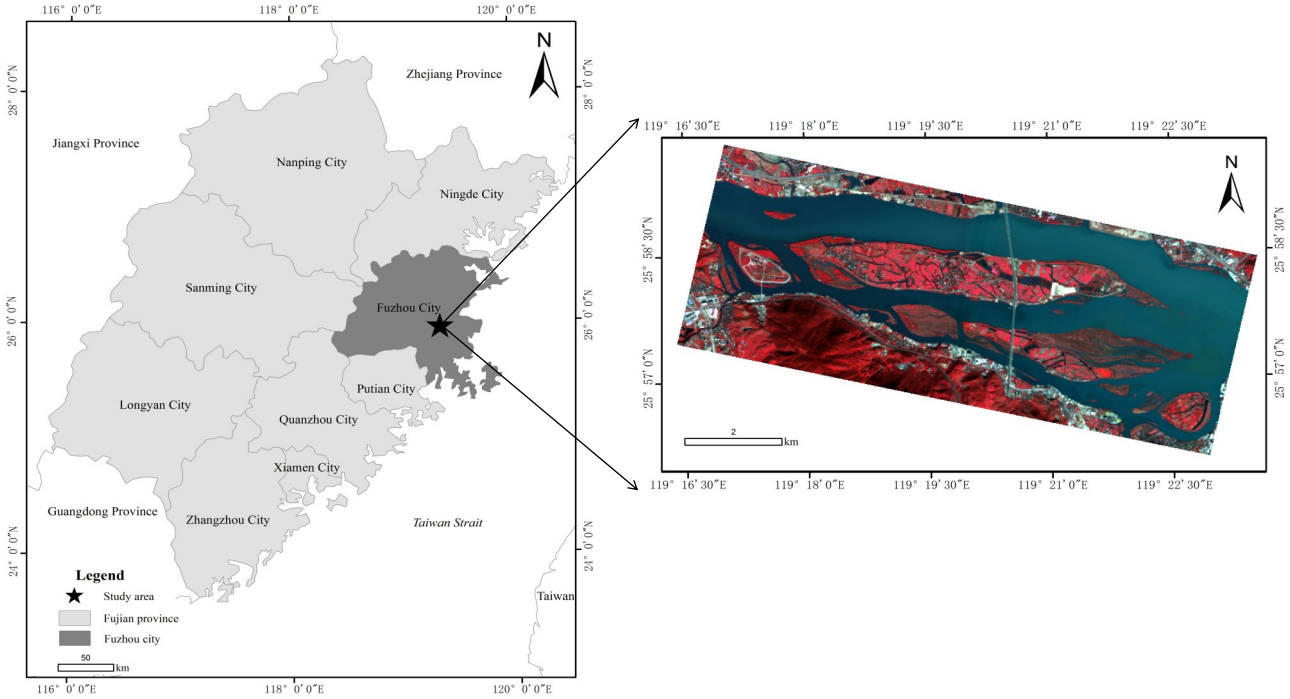


Fig. 1 Map of study area (left) and Standard false color image (right)

3. Data and Method

3.1. Data source

In this study, main data source includes a Terra ASTER imagery acquired on November 24, 2001 and a GF-1 PMS imagery acquired on November 30, 2013. In addition, this study uses Google Earth and topographic map at the scale of 1:50000.

3.2. Study method

3.2.1. Wetland classification system of Longxiang island area

Based on considering domestic and foreign wetland standard classification system, study area is divided into three different wetland types: natural wetlands, artificial wetlands and non-wetland respectively (Table 1). Among natural wetlands, it is divided into permanent river and shoals. In artificial wetlands, it is divided into freshwater aquaculture farms and agricultural ponds. In addition, non-wetland is divided into woodlands, arable lands, construction lands and bare lands respectively. The example pictures of different wetland type in Longxiang island area are shown as follows (Figure 2).

Table 1

Wetland types of Longxiang island area

Type	Subtype
Natural wetland	Permanent river
	Shoal
Artificial wetland	Freshwater aquaculture farm
	Agricultural pond
Non-wetland	Woodland
	Arable land
	Construction Land
	Bare land

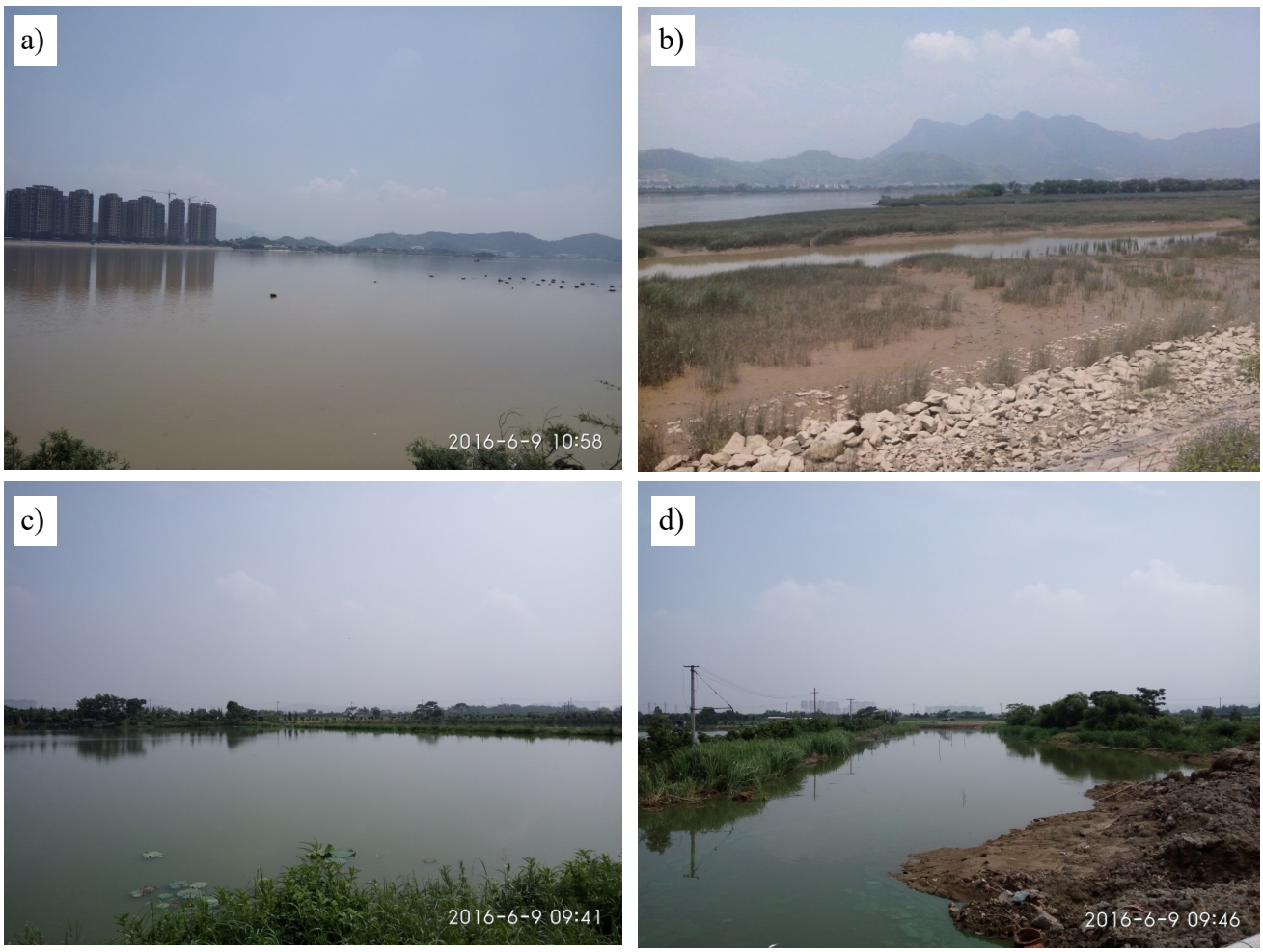


Fig. 2. Example of wetland types in Longxiang island area: a) Permanent river; b) Shoal; c) Freshwater aquaculture farm; d) Agricultural pond

3.2.2. Remote sensing preprocessing

3.2.2.1. Geometric correction

As Terra ASTER L1T data has been finished orthorectification, its geographic coordinate precision is higher than GF-1 PMS image. Therefore, this study sets Terra ASTER image data as a benchmark to finish geometric registration of GF-1 PMS image data and Google Earth image data acquired by 91 satellite map assistant respectively by selecting 22 uniformly distributed ground control points (GCP) which are mainly in intersection of road and river. The root mean square error (RMSE) is less than one pixel (RMSE_GF-1_PMS: 0.1933 m; RMSE_Google_Earth: 0.0197 m).

3.2.2.2. Radiometric calibration

Because of using spectral indexes such as normalized difference water index (NDWI) etc. during object-based classification, all acquired remote sensing images must conduct radiometric calibration.

3.2.2.3. Atmospheric correction

With the influence of atmosphere, the radiance energy that earth surface ground has acquired is not true spectral energy when remote sensing images receive surface ground reflective energy to imaging. Therefore, in quantitative remote sensing, atmospheric correction must be done to eliminate the influence of atmosphere to surface ground radiant energy. Currently, there are so many atmospheric correction methods such as MODTRAN, 6S and FLASSH etc. In this study, FLAASH is applied to complete remote sensing image's atmospheric correction. All remote sensing image's preprocess steps are operated in the software of ENVI.

3.2.3. Object-based classification

After completing all preprocess steps of Terra ASTER and GF-1 PMS images, wetland information and non-wetland information extraction steps are accomplished under the eCognition software which include image segmentation, threshold selection, establishment of classification rules, post-processing of image classification, accuracy assessment and result output. The detailed flowchart is shown in Figure 3.

Scale segmentation is one of the most fundamental and important step in object-based classification, scale selection directly influences the final classification result. If segmentation scale is too small, the image is sparse and if segmentation scale is too large, the image is too thick (Zhang *et al.*, 2011). After several experiments, this study finally chooses 15 as segmentation scale and color : shape is 8 : 2, smoothness : compactness is 5 : 5 both for Terra ASTER image and GF-1 PMS image. As to medium resolution remote sensing image, the majority of pixels is mixed pixel. The shape of surface ground object is relatively vague than high resolution remote sensing image, so the shape characters of ground objects have little influence on the image's segmentation (Xie *et al.*, 2012).

In the detained classification process, sample selector is applied to select typical ground types. Attention should be paid to the number of selected sample, the number of sample is not the

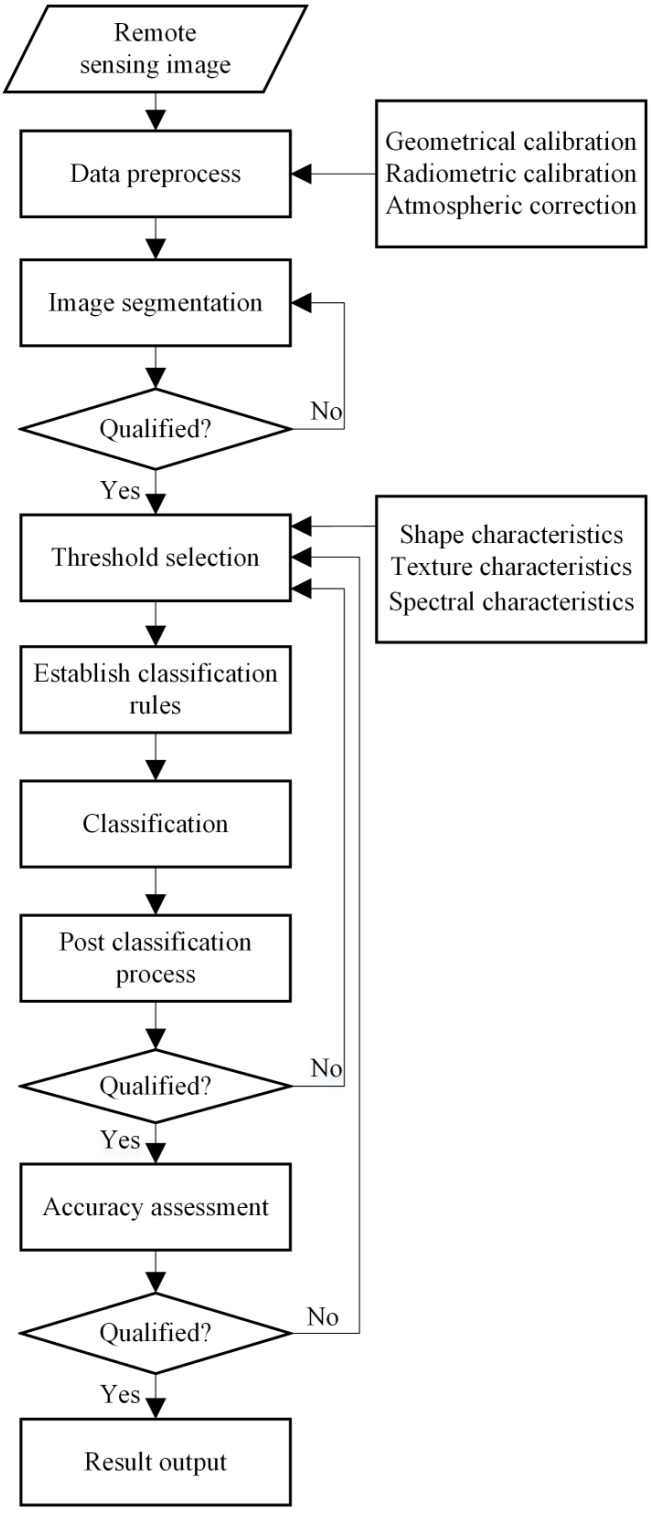


Fig. 3. Workflow of object-based classification

more the better and the fact is that with the number of samples increases, the classification accuracy approaches to saturation (Bo and Ding, 2010). After finishing selecting samples, the classification threshold is determined according to selected sample's spectral characters, shape characters and texture characters. Among spectral characters, this study uses each band's mean value, normalized difference water index (NDWI), normalized difference vegetation index (NDVI), brightness, each band's standard deviation and each band's ratio value etc., shape characters mainly include object area, length, shape index, length/width etc. The texture characters mainly include GLCM Homogeneity, GLCM Dissimilarity, GLCM Entropy and GLCM Contrast etc. (Li *et al.*, 2011, Wang *et al.*, 2009, Na *et al.*, 2015, Ren and Susan, 2012, Daniel *et al*., 2011, Hou *et al*., 2013, Ranjani *et al*., 2007, Zhang *et al*., 2011). After several experiments, this study finally acquires the classification rules of Terra ASTER and GF-1 PMS image, the classification trees of both remote sensing image are shown in Figure 4.

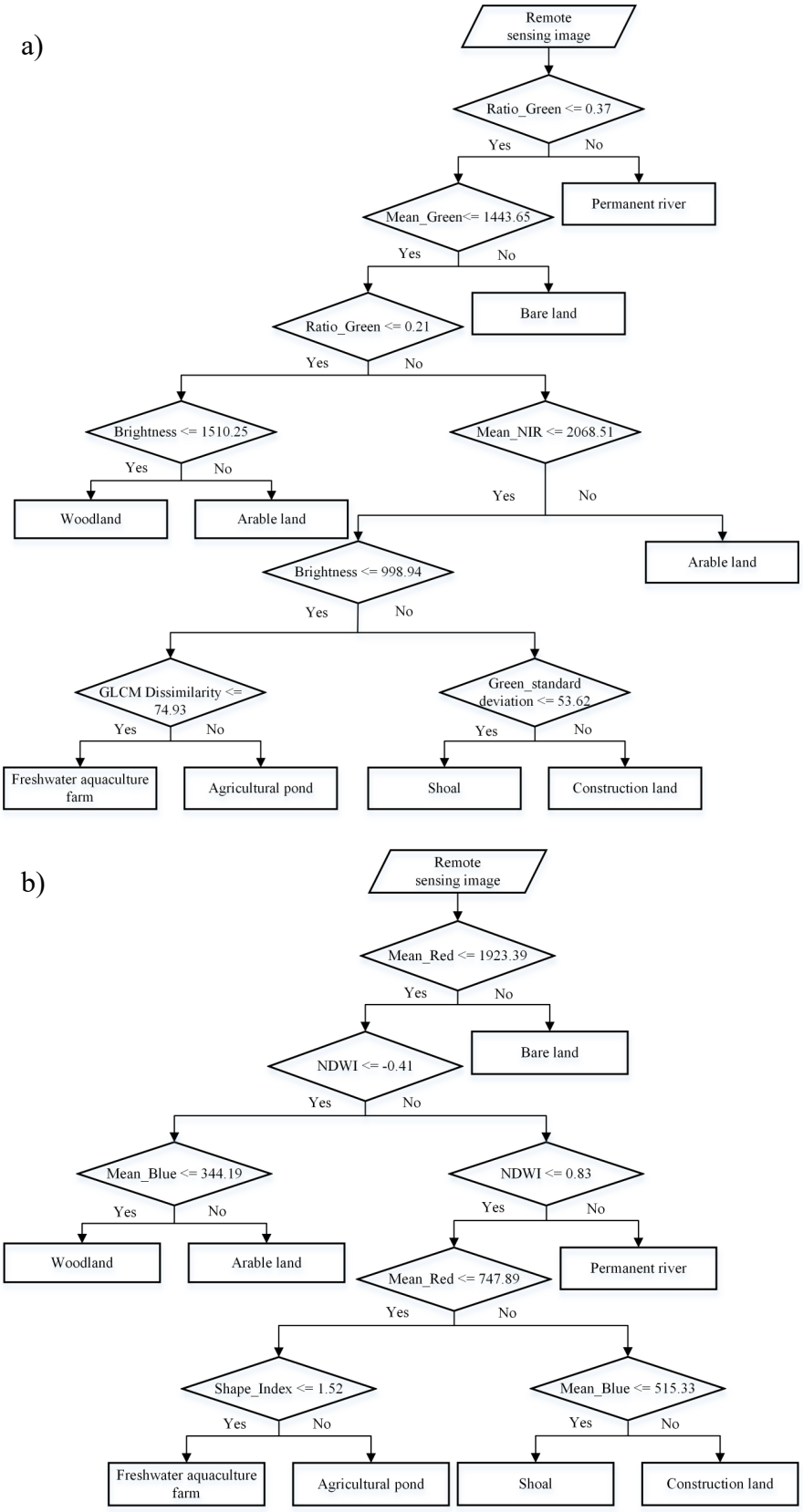


Fig. 4. Classification rules of each class of two images: a) Classification rules of Terra ASTER; b) Classification rules of GF-1 PMS

According to Figure 4, it can be concluded that, for Terra ASTER image, the ratio of green band is an effective index to distinguish permanent river, brightness is a better indicator to divide woodlands and arable lands. What's more, GLCM Dissimilarity is a better index to distinguish freshwater aquaculture farms and agricultural ponds, the standard deviation of green band can effectively distinguish shoals and construction land. For GF-1 PMS image, shape index is

an effective indicator to distinguish freshwater aquaculture farms and farm lands and NDWI is a better index to distinguish permanent river.

After finishing the classification, post-process of image classification is still needed which includes merge classification, modify small object and other steps.

3.2.4. Post classification accuracy assessment

The software of eCognition provides four accuracy assessment methods. This study adopts the Error Matrix based on TTA Mask accuracy assessment method which treats pixels as statistical objects to conduct accuracy assessment. Through 485 sample points acquired by field investigation and randomly created by ArcGIS 10.1 software, visual interpretation is realized according to Google Earth image and fused 2 m GF-1 PMS image. Then, each class's properties are given to vector points, what is needed to pay attention to is that the given properties must be consistent with the classification type's name. Finally, the result of Terra ASTER and GF-1 PMS images wetland classification accuracy assessment is given in Tables 2 and 3 respectively.

As is shown in Table 2, the overall accuracy of Terra ASTER image is 87.42% and Kappa coefficient is 0.84. Among all types, the highest producer accuracy of Terra ASTER image is permanent and the lowest is construction land. What can be concluded from Table 3 is that the overall accuracy of GF-1 PMS image runs up to 90.72% and Kappa coefficient is 0.87. In all types of GF-1 PMS image classification result, the producer accuracy and user accuracy of permanent river and freshwater aquaculture farms are both very high, on the contrary, the producer accuracy of agricultural ponds is the lowest.

There exists error between classification result and actual situation. However, the source of error is not only entirely caused by wrong classification. As to Terra ASTER image, because the imaging time is 2001 and with the lack of high resolution image data of the same time to assist in determine, subjective classification error is added when conducts visual interpretation to the 485 sample points. What's more, position deviation between sample points position and remote sensing image's equivalent position may also have impact on the final classification result.

Table 2

Accuracy assessment of classification of Longxiang island Terra ASTER image

Classification result	Ground true type								
	PR	WL	AL	CL	SL	FA	AP	BL	Total
PR	165	1	0	1	11	0	0	0	178
WL	0	74	3	4	1	0	0	0	82
AL	1	8	75	4	6	4	1	1	100
CL	1	0	3	9	0	0	1	1	15
SL	1	0	0	0	79	0	0	1	81
FA	0	0	1	0	0	11	0	0	12
AP	0	0	2	0	0	0	5	0	7
BL	0	1	1	1	0	0	0	7	10
Total	168	84	85	19	97	15	7	10	485
User's accuracy/%	92.70	90.24	75.00	60.00	97.53	91.67	71.42	70.00	
Producer's accuracy/%	98.21	88.10	88.24	47.37	81.44	73.33	71.42	70.00	
Overall accuracy=87.42% Kappa=0.84									

Table 3

Accuracy assessment of classification of Longxiang island GF-1 PMS image

Classification result	Ground true type								
	PR	WL	AL	CL	SL	FA	AP	BL	Total
PR	214	0	0	0	2	0	0	1	217
WL	1	79	1	3	0	0	0	0	84
AL	0	4	55	3	0	0	2	0	64
CL	3	10	3	39	0	0	0	3	58
SL	1	3	0	0	30	0	0	1	35
FA	0	0	0	0	0	9	0	0	9
AP	0	1	1	0	0	0	2	0	4
BL	0	0	0	2	0	0	0	12	14
Total	219	97	60	47	32	0	4	17	485
User's accuracy/%	98.62	94.05	85.94	67.24	85.71	100.00	50.00	85.71	
Producer's accuracy/%	97.72	81.44	91.67	82.98	93.75	100.00	50.00	70.59	
Overall accuracy=90.72% Kappa=0.87									

Notes: PR represents permanent river; WL represents woodland; AL represents arable land; CL represents construction land; SL represents shoal; FA represents freshwater aquaculture farm; AP represents agricultural pond; BL represents bare land.

4. Results and Analysis

4.1. Distribution of wetland and non-wetland in study area

After several experiments, the final wetland and non-wetland classification results of Terra ASTER image and GF-1 PMS image are acquired based on object-based classification method. The result is shown in Figure 5.

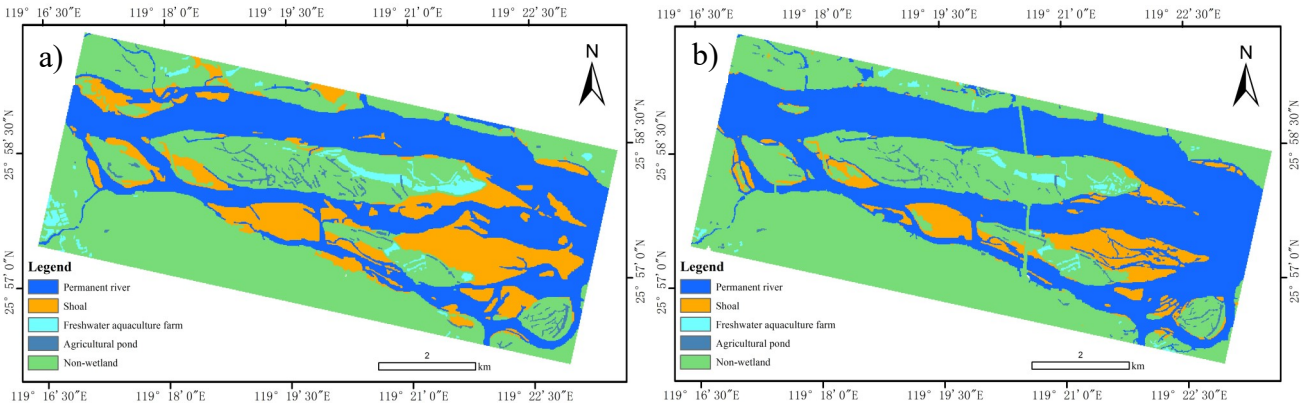


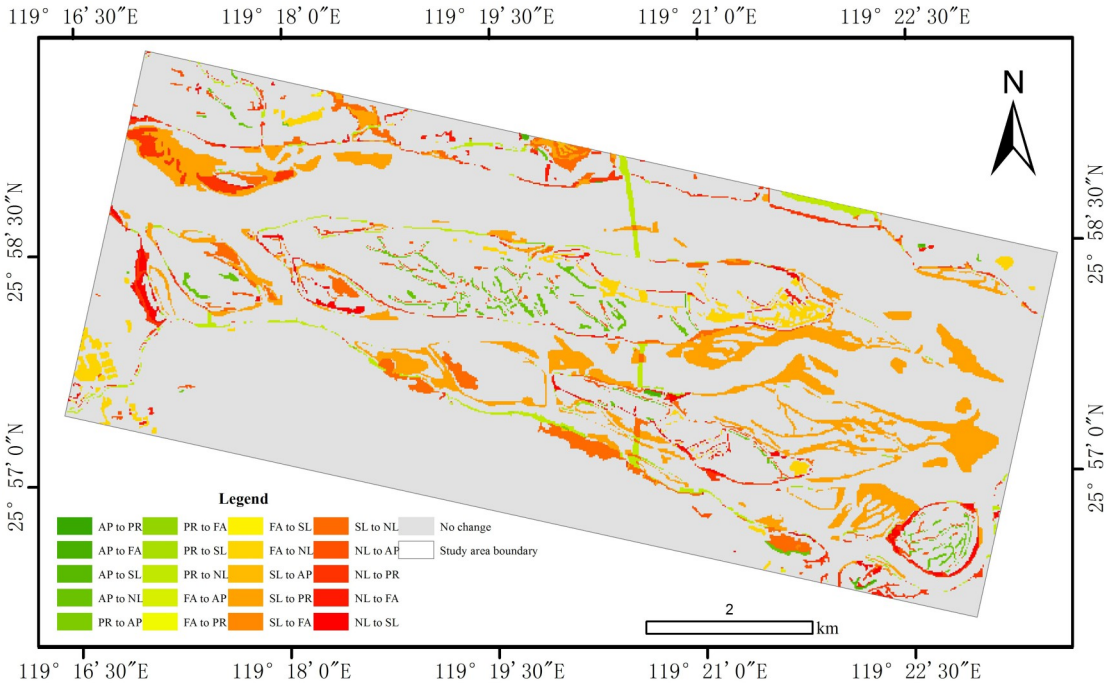
Fig. 5. Classification results of wetland and non-wetland in the study area: a) 2001; b) 2013

Compared with two periods classification results, significant changes have taken place both in wetland and non-wetland, however, the detailed change situation of each class is another thing. Compared with 2001, the area of permanent river in 2013 increases markedly, on the contrary, the area of shoals reduces significantly and the main reduced region is located in southeast and northwest of study area. At the same time, the freshwater aquaculture farms of study show significant reduction and the main decreased region is located in southwest of study area and in the Longxiang island. In addition, agricultural ponds appear a state of atrophy.

4.2. Conversion of wetland and non-wetland in study area

In order to obtain a specific knowledge of the conversion of Longxiang island area between wetland information and non-wetland information, construction lands, woodlands, arable lands and bare lands are merged as non-wetland class, and the change detection of Longxiang island area is completed based on the change detection platform in eCognition software, the result of change detection is shown in Figure 6.

As can be concluded from Figure 6, the region which non-wetland changes to permanent is mainly located in the northwest of study area. The region that non-wetland turns to shoals is mainly located in the southwest and southeast of study area. What's more, the region which shoals change into permanent river is mainly located in the southeast and northwest of study area, the region that shoals turn to non-wetland is mainly distributed in the both sides of permanent river. The region which permanent river changes into non-wetland is mainly located in the north of Longxiang island. And freshwater aquaculture farms mainly turn into non-wetlands and the main change region is located in Longxiang island-Lo Chau Bridge and nearby area and the southwest of study area. The region which agricultural ponds change into non-wetland is mainly distributed in Longxiang island-Lo Chau Bridge and nearby area.



Notes: AP represents agricultural pond; PR represents permanent river; FA represents freshwater aquaculture farm; SL represents shoal; NL represents non-wetland.

Fig. 6. Change detection of wetland and non-wetland in the study area

4.3. Area changes of wetland and non-wetland in study area

The classification result is converted to vector file based on eCognition software and under the support of ArcGIS 10.1 and Excel software, the matrix of area conversion and matrix of area convertible rate between various types of wetlands and between wetlands and non-wetlands in the study area from 2001 to 2013 are acquired. As is shown in Tables 4 and 5 respectively in which row represents the each ground object in 2013, column represents the each ground object in 2001. The value at the cross of (i, j) represents the convertible area (convertible rate) from i ground object in 2001 to j ground object in 2013. The total sum of row represents the total convertible area from other ground object types to one specific type between 2001 and 2013, the total sum of column repre-

sents the total convertible area from one specific type to other ground object types between 2001 and 2013 (Tian *et al*., 2011).

As is shown in Tables 4 and 5, from 2001 to 2013, the area that shoals turn into permanent river is about 3.888 km^2 which occupies about 46.69% of total shoal's conversion area; the area that shoals turn into non-wetland is about 0.962 km^2 which occupies about 11.55% of total shoal's conversion area. The area that permanent river turns into non-wetland is about 0.536 km^2 which occupies about 3.13% of total permanent river's conversion area. There is about two-thirds of total freshwater aquaculture farm's conversion area that turns into non-wetland, and what's more, there is about 62.12% agricultural pond's area that turns into non-wetland which shows that human activities have direct impact on the changes of agricultural ponds. In a word, among all wetland types, the conversion area of other wetland types is basically relatively small expect shoals turning into permanent river, and expect permanent river, the rest wetland types all convert massively into non-wetland, mostly is construction land.

Table 4

Matrix of area conversion between various types of wetlands and between wetlands and non-wetlands in the study area from 2001 to 2013

Ground type	Area conversion (km^2)					Total
	PR	SL	FA	AP	NL	
PR	16.488	3.888	0.003	0.001	0.720	21.100
SL	0.084	3.444	0.002	0.002	0.390	3.922
FA	0.000	0.010	0.409	0.026	0.140	0.585
AP	0.008	0.023	0.010	0.221	0.207	0.469
NL	0.536	0.962	0.663	0.410	21.842	24.413
Total	17.116	8.327	1.087	0.660	23.299	50.489

Table 5

Matrix of area convertible rate between various types of wetlands and between wetlands and non-wetlands in the study area from 2001 to 2013

Ground type	Area convertible rate (%)				
	PR	SL	FA	AP	NL
PR	96.33	46.69	0.28	0.15	3.09
SL	0.49	41.36	0.18	0.30	1.67
FA	0.00	0.12	37.63	3.94	0.60
AP	0.05	0.28	0.92	33.49	0.89
NL	3.13	11.55	60.99	62.12	93.75

Notes: AP represents agricultural pond; PR represents permanent river; FA represents freshwater aquaculture farm; SL represents shoal; NL represents non-wetland.

5. Conclusion and Discussion

This paper aims to apply object-based classification method to extract wetland information and non-wetland information according to the Terra ASTER image and GF-1 PMS image acquired in 2001 and 2013 respectively. And on basis of this, wetland change detection is completed in the eCognition software and the detailed changes is accomplished in the ArcGIS 10.1 and Excel software, the conclusions are as follows:

1) The overall classification accuracy of Terra ASTER image in 2001 runs up to 87.42%, and Kappa coefficient is 0.84; The overall classification accuracy of GF-1 PMS image in 2013 is

90.72%, and Kappa coefficient is 0.87. Because Terra ASTER image lacks the blue band and this study lacks the high resolution remote sensing image in 2001, what's more, the validate sample points and the corresponding position in remote image may exist error, wrong classification error is added to a certain extent.

2) From 2001 to 2013, in the macro scale, the total wetland area decreases 4.05% and the reduced area is 1.1 km^2, among the changes, the total decreased percentage of natural wetland including permanent river and shoals is 1.65%, and the reduced area is 0.42 km^2, the total reduced percentage of artificial wetland including freshwater aquaculture farms and agricultural ponds is 39.76% and the decreased area is 0.68 km^2; In addition, the total increased percentage of non-wetland is 4.71% and the increased area is 1.1 km^2. Overall, the total area of natural wetland and non-wetland change slightly while the total area of artificial wetland reduces significantly. In the micro scale, there is about 3.888 km^2 shoals that turn into permanent river in natural wetland; There is about 0.663 km^2 freshwater aquaculture farms and about 0.41 km^2 agricultural ponds that change into non-wetland which shows human activities have impact on the changes of wetland.

In the course of concrete classification process, because the spatial resolution of Terra ASTER image and GF-1 PMS image is 15 m, this has certain influence on true artificial wetland area as the freshwater aquaculture farms and agricultural ponds are easy to form mixed pixels with the surrounding pixels, in future work, methods of decomposition mixed pixels can be applied to improve classification accuracy. In addition, the scale of remote sensing images segmentation can have an important impact on the final classification result, if the scale is too large, the dissimilarity of image can not be fully distinguished, and if it is too small, the remote sensing image after segmented is too dense, therefore, the optimal segmentation scale still remains to be further studied. What's more, as the acquired date of remote sensing image is in winter, however, in winter, most arable lands in Longxiang island area is still in the state of fallow which can be easily mixed with shoals in single remote sensing image, so in the future work, combining multi-temporal consistent remote sensing images in one year can be tried to improve the classification accuracy effectively.

We appreciate Associate Professor Li Xintong from Fujian Normal University, Fujian, China for providing GF-1 PMS remote sensing image in 2013 and the eCognition software developed by Definiens Imaging company, Germany and the ArcGIS 10.1 software developed by ESRI company, America. The United States Geological Survey is appreciated for its permission of downloading Terra ASTER image.

References

1. Bo Shukui, Ding Lin, 2010. The effect of the size of training sample on classification accuracy in object-oriented image analysis. *Journal of Image and Graphics*, 15(7):1106-1111. (in Chinese)

2. Coppin I P, Jonckheere K *et al*., 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9):1565-1596.

3. Daniel Rokitnicki Wojcik, An Huawei *et al*., 2011. Transferability of object-based rule sets for mapping coastal high marsh habitat among different regions in Georgian Bay, Canada. *Wetlands Ecology and Management*, 19(3): 223-236.

4. Hou Qunqun, Wang Fei *et al.*, 2013. Extraction of color image texture feature based on gray-level co-occurrence matrix. *Remote Sensing for Land & Resources*, 25(4):26-32. (in Chinese)

5. Hu Rongming, Wei Man *et al.*, 2012. Taking SPOT5 remote sensing data for example to compare pixel-based and object-oriented classification. *Remote Sensing Technology and Application*, 27(3):366-371. (in Chinese)

6. Jia Mingming, Ren Chunying *et al.*, 2014. Object-oriented forest classification based on combination of HJ-1 CCD and MODIS-NDVI data. *Acta Ecologica Sinica*, 34(24):7167-7174. (in Chinese)

7. Li Jianping, Zhang Bai *et al.*, 2007. Current status and prospect of researches on wetland monitoring based on remote sensing. *Progress in Geography*, 26(1):33-43. (in Chinese)

8. Li Zhifeng, Zhu Guchang *et al*., 2010. Application of GLCM based texture features to remote sensing image classification. *Geology and Exploration*, 47(3): 456-461. (in Chinese)

9. Mo Lijiang, Cao Yu *et al.*, 2012. Object-oriented classification for satellite remote sensing of wetlands: A case study in southern Hangzhou Bay area. *Wetland Science*, 10(2):206-213. (in Chinese)

10. Na XD, Zang SY *et al.*, 2015. Mapping forested wetlands in the Great Zhan River Basin through integrating optical, radar and topographic data classification techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(11): 696-713.
11. Ranjani Kulawardhana, Prasad Thenkabail *et al*., 2007. Evaluation of the wetland mapping methods using Landsat ETM+ and SRTM data. *Journal of Spatial Hydrology*, 7(2):62-96.
12. Ren Zongruan, Susan Ustin, 2012. Mapping of freshwater lake wetlands using object-relations and rule-based inference. *Chinese Geographical Science*, 22(4):462-471.
13. Tian Rong, Cao Chunxiang *et al*., 2011. Changes and driving factors of plateau wetlands in Maduo county. *Wetland Science*, 9(1):61-68. (in Chinese)
14. Töyrä J, Pietroniro A, 2005. Towards operational monitoring of a northern wetland using
15. Geomatics-based techniques. *Remote Sensing of Environment*, 97(2):174-191.
16. Wang Jianfang, Bao Shitai, 2004. Application of object-oriented interpretation to information classification on remote sensing image. *Tropical Geography*, 26(3):234-238. (in Chinese)
17. Wang Wenjie, Zhao Zhongming *et al*., 2009. Object-oriented change detection method based on features fusion for high-resolution remote sensing image. *Application Research of Computers*, 26(8):3149-3151. (in Chinese)
18. Xie Jing, Wang Zongming *et al*., 2012. Remote sensing classification of wetlands using object-oriented method and multi-season HJ-1 images: A case study in the Sanjiang Plain north of the Wandashan Mountain. *Wetland Science*, 10(4):429-438. (in Chinese)
19. Yuan Jun, Lu Xianguo, 2004. Progress in research of functional assessment of wetlands. *Wetland Science*, 2 (2):153-160. (in Chinese)
20. Zhang Jiping, Zhang Yili *et al.*, 2011. Identifying alpine wetlands in the Damqu River Basin in the source area of the Yangtze River using object-based classification method. *Journal of Resources and Ecology*, 2(2):186-192.
21. Zhang Jun, Zhu Guolong *et al.*, 2011. Scale effect and optimal scale in object-oriented information extraction of high spatial resolution remote sensing image. *Science of Surveying and Mapping*, 36(2):107-110. (in Chinese).

STUDY ON ECOLOGICAL VULNERABILITY ASSESSMENT OF SMALL WATERSHED BASED ON GIS

Liu Guangjie, Wang Jinliang
College of Tourism & Geographic Sciences, Yunnan Normal University

Abstract: *Ecological vulnerability assessment is an important method to measure the ecological environment of a region. The evaluation method of ecological environment vulnerability is one of the hotspots of environmental science research, which has made great progress and obtained many valuable results. Based on the geographic information system(GIS) and remote sensing (RS) method, this paper studied the method of ecological vulnerability assessment of small watershed. Using the causes and results of performance methods established the index system of ecological vulnerability assessment of small watershed. The weight of each evaluation factor in the evaluation index system was determined by analytic hierarchy process(AHP). The small watershed area was divided into five different levels of vulnerability area, such as the potential vulnerable areas, micro, mildly vulnerable areas, moderately vulnerable areas and severely vulnerable areas. Fuxian lake basin is located in Yuxi City, Yunnan Province, China, which is not only a famous scenic area but also a protected area of the ecological environment protected by the Chinese government. The ecological vulnerability assessment of Fuxian lake basin was carried out by using the established evaluation method. The spatial distribution of the ecological fragility of Fuxian lake basin was comprehensively and intuitively recognized. The results show that the ecological environment of Fuxian lake basin in 2012 is better, the ecological fragility of the whole area is lower and the ecological stability is stable.*

Keywords*: small watershed, ecological vulnerability assessment, Fuxian lake basin, GIS*

Introduction. With the rapid development of human society and the destruction of ecological environment, researching on ecological vulnerability has been paid more and more attention in recent years. The evaluation method of ecological environment vulnerability is one of the hotspots of environmental science research, which has made great progress and obtained many valuable results (Zhaoxueyan et al, 2016; Hong, Wuyang et al, 2016). However, the objective fact of ecological environment heterogeneity requires that the method of ecological vulnerability evaluation has a strong pertinence. At present, besides the research of the general evaluation, the methods of ecolog-

ical vulnerability assessment are mostly aimed at the wetland, water body, ocean, karst area, desert area or other specific areas, but little research on the evaluation method of small lake basin. Evaluating ecological vulnerability of small watershed scientifically takes an important practical significance on guiding its development and management, avoiding and reducing the problem of ecological environment. In this paper, the ecological vulnerability assessment of small watershed is studied.

Study Area and Data Sources. Fuxian Lake is located in the center of the five major lakes (Fuxian Lake, Xingyun Lake, Qilu Lake, Yangzonghai Lake and Dianchi Lake) in central Yunnan China, with horizontal distances from Dianchi Lake, Qilu Lake and Yangzonghai Sea being 17, 18, 27 km. Fuxian Lake Basin is one of the lowest forest coverage areas in Yuxi, as shown in Figure 1. As a result of long-term anthracnose burning, there is a small amount of evergreen broad-leaved forest in remote areas. At present, the vegetation in the watershed area is mainly composed of secondary forests such as *Pinus yunnanensis*, *Pinus armandii*, and shrubs.

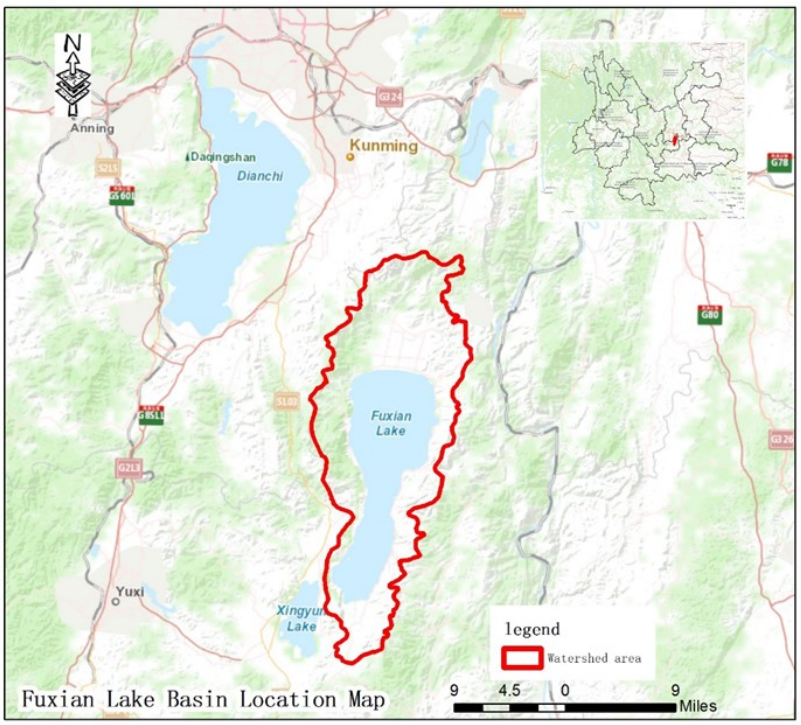


Fig. 1. Location of The Study Area

The data involved in the study are as follows:

a) Landsat remote sensing image (Landsat ETM+ data, 129 path and 43 row, 2012-01-20) of Fuxian Lake watershed in 2012

b) Economic statistics (Chengjiang County, Huaning County and Jiangchuan County)

c) Yunnan Province Basic Geographic Information Center to provide DEM data (grid size of 10m × 10m)

d) Evapotranspiration and precipitation data from the Yuxi meteorological bureau in 2012.

Material and Methods. In the evaluation process of ecological vulnerability, the selection of specific evaluation methods is very important. According to the different characteristics of the indicators, the evaluation methods that can express the characteristics of the system should be selected according to the characteristics of different data. Fuzzy comprehensive evaluation method, ecological frangibility index (EFI) method, analytic hierarchy process (AHP) method, principal component analysis method and so on were all widely used in the domestic ecological environment vulnerability analysis methods (Xu Guangcai et al, 2009), while these methods in other types of evaluation

process also be used. In the all above methods, the AHP method has been applied in the assessment of ecological vulnerability in China, such as Hengyang Basin, Hangzhou Xixi Wetland, Poyang Lake Area and Tumen River Basin (Nan Ying et al, 2013), and it has a certain representative significance. Compared with other methods, the AHP method has a wide range of application, and the weights of the indicators are determined according to expert opinion (Zhang Dejun et al, 2014). Therefore, this study used the AHP to evaluate the ecological vulnerability of the study area.

The construction of the index system is the core of the evaluation work. Each index is the basic element of the evaluation. Building the vulnerability evaluation index system is the basic condition and theoretical basis of the vulnerability calculation. The success or failure of the index system determines the authenticity and feasibility of the evaluation results. At present, China's environmental vulnerability assessment index system, mainly divided into a single type of regional indicators and comprehensive index system two categories, the single type region index system and the comprehensive index system. The single type region index system is based on specific geographical background, has regional characteristics, simple structure, strong pertinence, and can accurately characterize the key factors of fragile regional environment. The comprehensive index system is a comprehensive index, which can reflect the natural environment, social development and economic development of the ecological environment. It not only takes into account the characteristics of the inherent function and structure of the environmental system, but also the environmental system and the outside world. The existing comprehensive evaluation index system can be divided into the following three types: the cause and result performance indicator system, the multi-system evaluation index system based on the stress-state-response (PSR) ecological fragile area sustainable development index system. The index system should be established according to the actual situation of the ecological environment of the river basin. In this study, the ecological vulnerability assessment of watersheds was carried out by using the method of index system of cause-result-expression in the comprehensive index system. Ecological vulnerability assessment index and evaluation criteria for small watershed were established, the main index system shown in Figure 2.

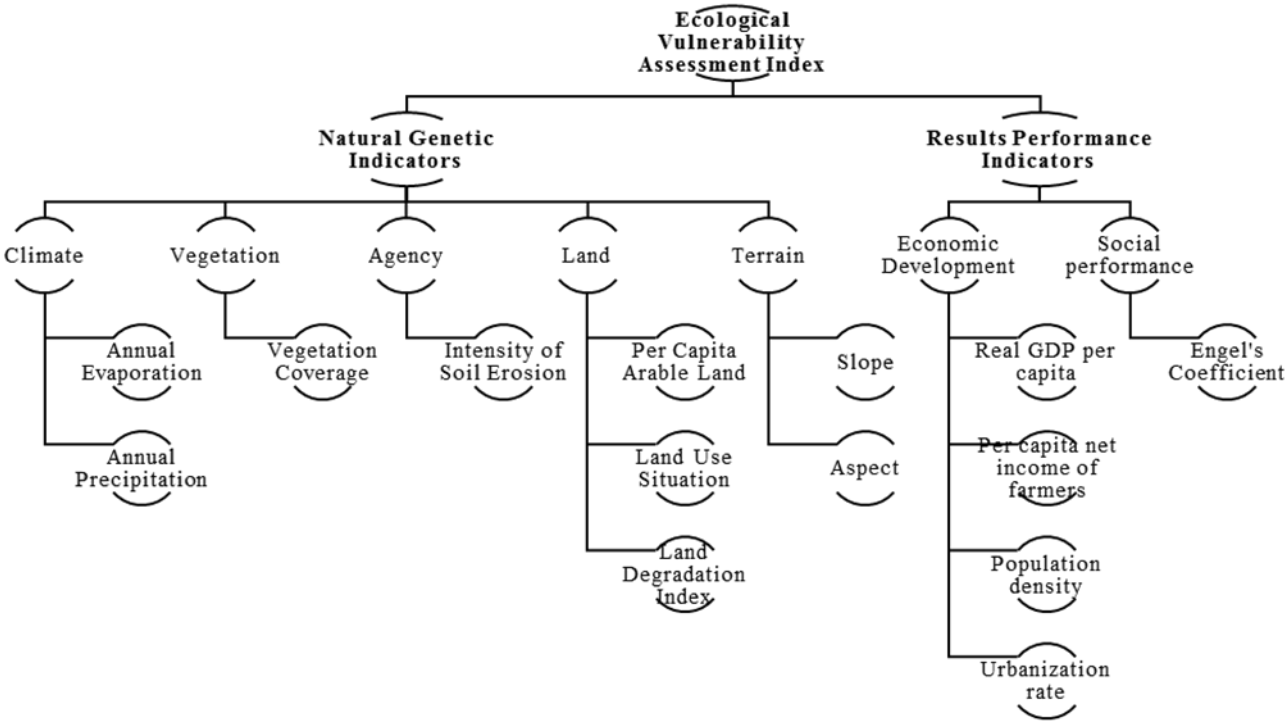


Fig. 2. Ecological Vulnerability Assessment Index System of Small Watershed

The weight of the primary index is determined by the AHP. The relative importance matrix of the evaluation index is established by the experts through the comparison of the evaluation indexes. The eigenvalues corresponding to the maximum eigenvalues of the consistency test are normalized by the eigenvalues of the matrix and corresponding eigenvectors to obtain the weight of the corresponding indicators. This study uses the widely-used software yaahp (Yet Another AHP, Foreology Software) to carry on the analytic hierarchy process to the index system (WenGuang et al, 2014). In the comparison of the relative importance of index weight, the importance of comparative analysis of indicators is determined according to experts' opinions. Finally, the weights of each index system are shown in Table 1.

Table 1

Evaluation Index System and Index Weight of Ecological Carrying Capacity

Evaluation Synthesis		Evaluation item	Evaluation Factor	Factor weight
Ecological Vulnerability Assessment (A)	Natural Genetic Indicators	Terrain B1	C11 Slope	0.1239
			C12 Aspect	0.0620
		Land B2	C21 Per Capita Arable Land	0.0376
			C22 Land Use Situation	0.1036
			C23 Land Degradation Index	0.1286
		Agency B3	C31 Intensity of Soil Erosion	0.1050
		Vegetation B4	C41 Vegetation Coverage	0.1371
		Climate B5	C51 Annual Evaporation	0.0712
			C52 Annual Precipitation	0.0456
	Results Performance Indicators	Economic Development B6	C61 Real GDP per capita	0.0226
			C62 Per capita net income of farmers	0.0377
			C63 Population Density	0.0286
			C64 Urbanization Rate	0.0354
		Social Performance B7	B71 Engel's Coefficient	0.0611

Due to the large difference in the dimension of the collected data, it is necessary to standardize the original data series of all the collected data to eliminate the influence of the original data dimension. After several experiments, it is found that the maximum and minimum values of the data processed by the maximum-minimum normalization method are different. When the economic statistical data are processed, the results do not accord with the real difference, resulting in interregional differences. The maximum normalization method can effectively avoid this result, so the study uses the maximum normalization method to standardize the original data series, as shown in formula 1.

$$T_{ij} = \frac{T_{ij}(0)}{T_j(\max)}, \tag{1}$$

The T_{ij} is the standardized value of each index, T_{ij} *(0)* is the original value of the *j* index of the *i* area, T_j *(max)* is the maximum value of the *j* index in all regions.

Among the 14 indicators, the vulnerability index is positively correlated with the 8 indexes, and the 6 indexes are inversely related. Therefore, the six indicators which are related to the inverse are used in the calculation process 2 unifying the correlation.

$$T_{ij} = 1 - \frac{T_{ij}(0)}{T_j(\max)}, \tag{2}$$

In order to evaluate the ecological vulnerability of the watershed, it is necessary to determine the specific evaluation unit in order to facilitate the evaluation of the ecological vulnerability of the watershed, because the data obtained in the process of ecological vulnerability assessment of small wa-

tershed has many sources and types. The size of the evaluation unit tends to vary depending on the data and the size of the evaluation area. In the evaluation of ecological vulnerability of small watershed, because of the relatively small spatial scale, the evaluation unit will be set up too large will appear between the adjacent evaluation unit data difference is large, low spatial resolution of the evaluation results, it is difficult to statistics by administrative region and other issues. While the evaluation unit is set too small will increase the amount of data, to the statistical problems of spatial data. After the experiment and research, the evaluation unit should be less than 60 m in the watershed area of less than 1000 km^2, according to the requirements of evaluation accuracy and software calculation ability.

Because the research is based on the spatial evaluation unit, it is necessary to convert the non-spatial data such as economic statistics and population data to facilitate the spatial statistics. The main conversion methods for these indicators are as follows:

a) The county, township-level statistics given to the corresponding administrative division map.

b) Use ArcGIS's transformation module to convert the vector data to raster data with a grid size of 30 meters.

c) Using the watershed boundaries cut the data to obtain the corresponding spatial distribution of economic statistics data.

According to relevant research results (Ma Jun et al, 2015), using the hierarchical assignment method for processing the data of qualitative indicators, such as land use, land degradation intensity, soil and water loss intensity (Table 2).

Table 2

Qualitative Index Assignment Standard

Item	Standardized Assignment				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Land Use	Woodland, Water	Grassland	Cultivated field	Urban construction land	Bare
Land Degradation	Not degraded	Mild degradation	Moderate degradation	Severe degradation	Extremely degraded
Intensity of Soil Erosion	Micro	Mild	Moderate	Severe	Extremely

By constructing the ecological vulnerability evaluation model, the ecological vulnerability index (EVI) was calculated by applying the multi-factor weighted sums in the ArcGIS environment, and the ecological fragility was quantitatively expressed in the formula:

$$EVI = \sum_{i=1}^{n}(A_i \cdot W_i) \ , \quad (3)$$

Where, A_i is the i evaluation factor normalization value, W_i is the index weight, n is the number of indicators.

In order to facilitate the research and comparison, it is necessary to classify the ecological vulnerability index according to certain rules. Because of the evaluation index system and the evaluation method, there are great differences in ecological fragility grading between domestic and foreign research. According to the comparative analysis of the result data, the region with the ecological vulnerability index below 0.3 is a potential vulnerable area. The Micro - fragile area is between 0.3 and 0.4. Mild fragile zone is between 0.4 and 0.45. The zone, between 0.45 and 0.5, is the moderate fragility, and 0.5 above is the region for severe fragility.

Results and Discussion. According to the spatial resolution of the remote sensing image, the evaluation unit size of the ecological vulnerability assessment of Fuxian Lake basin is 30m * 30m. The standardized data are transformed into grid data according to the above method, and the formula 3 is used to calculate the raster calculator function of ArcGIS. The evaluation results are shown in Figure 3.

Table 3

The area and proportion of ecological vulnerability in 2012

Ecological Vulnerability Level	Area (km^2)	Percentage (%)
Potential	80.94	17.64
Micro	199.22	43.42
Mildly	79.4	17.31
Moderately	48.12	10.49
Severely	51.12	11.14

It can be seen from the Figure 3, in space, the ecological fragile areas are mainly distributed in steep areas along the slope of Fuxian Lake. The ecological environment of east coast and north shore of Fuxian Lake is relatively fragile compared with other regions. It can be seen from the figure that the ecological fragile areas of Fuxian Lake Basin are mainly distributed in the areas with relatively high elevation, few vegetation and steep terrain. In the urban areas, forest and other regional ecological environment is more stable. As can be seen from table 3, the total area of potential fragile and micro-fragile grading in the Fuxian Lake Basin accounts for 61.06% of the total watershed area, and the severe fragile area accounts for only 11.14% of the drainage area. The ecological environment of Fuxian Lake Basin in 2012 is better, the ecological fragility of the whole region is lower, and the ecology is stable.

Fig. 3. Fuxian Lake Basin Ecological Vulnerability Intensity Level Distribution, year 2012

Conclusion and Prospect. Based on the GIS method, this paper studies the method of ecological vulnerability assessment of small watershed, establishes the index system of ecological vulnerability assessment of small watershed, and provides the method of establishing the weight of evaluation index, and divides the small watershed area into five different level of vulnerability. The ecological vulnerability of Fuxian Lake Basin was evaluated by the established evaluation method.

In the evaluation index system, many of the evaluation indexes are selected according to the characteristics of the river basin. Therefore, the evaluation indexes should be adjusted according to the situation of the study area, so as to make the evaluation index system have the pertinence to the research area. The index weight of each evaluation factor is determined by AHP. Because the importance of expert judgment index has great influence on the determination of index weight, the evaluation result is influenced by the subject background and academic level of the participating experts. This method is still to be further studied and improved in solving the problem of universality and pertinence.

List of references

1. Zhao X.Y., Liu C.F., Wang X.L., Xue B. Assessment of the vulnerability of farmers' livelihoods to ecological degradation in arid regions of a continental river basin: a case study of the middle—lower reaches of the Shiyang river in China [J] // Acta Ecologica Sinica. – 2016. – № 36(13). – P. 4141-4151.
2. Hong W, Jiang R, Yang C, et al. Establishing an ecological vulnerability assessment indicator system for spatial recognition and management of ecologically vulnerable areas in highly urbanized regions: A case study of Shenzhen, China [J] // Ecological Indicators, 2016. – № 69. – P. 540-547.
3. Xu Guangcai, Kang Muyi, He Lina. Advances in research on ecological vulnerability [J] // Acta Ecologica Sinica, 2009. – № 5. – P. 2578-2588.
4. Nan Ying, Ji Zhe. On eco-security evaluation in the Tumen River region based on RS&GIS [J] // Acta Ecologica Sinica, 2013. – № 15. – P. 4790-4798.
5. Zhang Dejun, Gao Hang, Yang Jun. Assessment for the Ecological Vulnerability of Nansihu Wetland Based on GIS Technology [J] // Resources Science, 2014. – № 04. – P. 874-882.
6. WenGuang W, JiHong Z, YanWei W, et al. The ecological risk assessment of Bullacta exarata in Laizhou Bay: the YAAHP software implementation based on AHP [J] // Journal of Fisheries of China, 2014. – № 38(9). – P.1601-1610.
7. Fan Zhewen, Liu Musheng, Shen Wenqin. GIS-based Assessment on Eco-vulnerability of Jiangxi Province [J] // Geo-information Science, 2009. – № 02. – P. 202-208.
8. Ma Jun, Li Changxiao, Wei Hong Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Municipality, China [J] // Acta Ecologica Sinica, 2015. – № 21. – P. 7117-7129.
9. De Lange H J, Sala S, Vighi M, et al. Ecological vulnerability in risk assessment—a review and perspectives [J] // Science of the Total Environment, 2010. – № 408(18). – P. 3871-3879.
10. Abson D J, Dougill A J, Stringer L C. Using principal component analysis for information-rich socio-ecological vulnerability mapping in Southern Africa [J] // Applied Geography, 2012. – № 35(1). – P. 515-524.
11. Zhong Xiaojuan, Sun Baoping, Zhao Yan. Ecological vulnerability evaluation based on principal component analysis in Yunnan province [J] // Ecology and Environment, 2011. – № 01. – P. 109-113.

УДК 630*116.13:582.475 (470.343)

ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ПОЧВ В ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗАХ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ

Ю.П. Демаков , А.В. Исаев, С.Н. Бродников, В.Г. Краснов
Поволжский государственный технологический университет

Приведены результаты исследований микроклимата почв в нескольких лесных экотопах Республики Марий Эл в разные по погодным условиям годы. Замеры температуры выполняли на глубине 5, 10, 20, 40, 60 и 80 см электронным термометром «мини-щуп» с погрешностью ±0,1°С, а оценку влажности почв проводили весовым методом с отбором образцов специальным буром. Полученный цифровой материал обработан на компьютере с использованием стандартных методов математической статистики и прикладных программ Excel и Statistica. Определены пределы и закономерности сезонной динамики температуры и влажности разных слоев почв. Установлено, что размах значений температуры самых верхних слоев почвы в течение вегетационного периода составил 13,8-14,0°С, а нижних – 10,3-11,5°С. С увеличением глубины измеряемого слоя почвы предел изменений температуры постепенно уменьшается. В годы с прохладной погодой максимум температуры всех слоев почвы отмечался обычно в конце июля - начале августа, а с жаркой – во второй половине августа. Влажность суглинистых и глинистых почв изменялась от 11,5 до 62,0 %, а песчаных – от 1,08 до 5,86 % по отношению к их воздушно-сухой массе. Показано, что микроклимат почв зависит от их гранулометрического состава, характера и толщины напочвенного покрова, полноты и состава древостоя. Сделан вывод о необходимости организации регулярных наблюдений за температурой и влажностью почв в заповедниках и других ООПТ, которые помогут выявить существующие тенденции изменения климата и реакцию на них лесных экосистем.

Ключевые слова: *лесные биогеоценозы; почвы; температура; влажность; пространственная вариабельность; сезонная и погодичная динамика.*

CHARACTER OF PARAMETERS CHANGE OF SOIL MICROCLIMATE IN FOREST BIOGEOCENOSIS OF MARI EL REPUBLIC

Yu.P. Demakov, A.V. Isaev, S.N. Brodnikov, V.G. Krasnov
Volga State University of Technology

The results of soil microclimate researches in several forest ecotopes of Mari El Republic in different weather conditions years are presented in the article. Temperature measurements were performed at a depth of 5, 10, 20, 40, 60 and 80 cm with electronic thermometer "Mini probe" with an accuracy of ±0,1°C, and the assessment of soil humidity was carried out by the weight method with sampling special drill. Resulting digital material is processed on a computer using the standard methods of mathematical statistics and application programs Excel and Statistica. The limits and patterns of the seasonal dynamics of the temperature and humidity of different soil layers were determined. It was found, that the temperature range of the uppermost soil layers during the growing period amounted to 13,8-14,0 ° C and lower soil layers - 10,3-11,5 ° C. The limit of temperature changes gradually decreases with the depth increasing of the measured soil layer. In years with cool weather, the temperature of all soil layers usually peaked in late July and early August, and in years with hot weather the temperature peaked in the second half of August. Humidity of clay-loam soil and loamy soil ranged from 11.5 to 62.0%, and sandy soil, which exhibit very low moisture capacity - from 1.08 to 5.86% relative to its air-dry weight. It is shown that the microclimate of soil depends on the particle-size composition, nature and thickness of the ground cover, and completeness and composition of growing stock. The article concluded that there is a need to organize regular observations of temperature and soil humidity in natural reserves and other categories of specially protected natural reservation, which will help to identify the existing trends of climate change and the response of forest ecosystems.

***Keywords**: forest biogeocenosis, soil, temperature, humidity, spatial variability; seasonal and year-by-year dynamics.*

Введение. Почва, являющаяся важнейшим компонентом лесных экосистем, определяющим структуру и продуктивность древостоев, находится под мощным влиянием природных и антропогенных факторов, обуславливающих её текущее состояние и дальнейшее развитие. Решающее значение на естественную динамику почв оказывал и продолжает оказывать климат, влияющий прямо или косвенно на их тепловой, водный и воздушный режимы. Прямое влияние климата проявляется в непосредственном воздействии его на увлажнение или иссушение почвы, в результате которого изменяется не только её объем (при увлажнении происходит увеличение объема почвы, а при иссушении, наоборот, усадка), но и другие параметры. Этот процесс имеет циклический характер, который проявляется в суточной, сезонной и многолетней динамике температуры и влажности почвы, что отражается на состоянии и продуктивности фитоценозов, а также других компонентов экосистем (Орлов, 1953; Молчанов, 1961; Шульгин, 1967; Коротаев, 1987). Установлено, к примеру, что при усадке почвы из содержащихся в ней песчаных и пылеватых частиц образуются глыбистые агрегаты, имеющие жесткий каркас, препятствующий крошению почвенной массы (Воронин, 1986; Татаринцев, 2015), что, в свою очередь, приводит к снижению плотности сложения почвы и улучшению её лесорастительных свойств. Образование глыбистых агрегатов в легкосуглинистых почвах возрастает по мере снижения влажности, а при уменьшении количества гумуса в почве способность к глыбообразованию растет. Существенное влияние на микроклимат почв оказывает и лесной полог, так как он ограничивает поступление солнечной энергии и атмосферных осадков, дольше сохраняет снеговой покров в лесу, изменяет излучение подстилающей поверхности и нивелирует температурный режим приземного воздуха.

В настоящее время температурный и влажностный режим лесных почв рассматривается в качестве одного из важнейших факторов, влияющих на углеродный цикл наземных экоси-

стем. Поэтому не случайно, что многие исследователи (Кононенко, 1986; Клинцов, 1988; Архангельская, 2008; Битюков, 2012; Десяткин и др., 2012; Галенко, 2013) уделяют большое внимание изучению микроклимата почв наземных экосистем, развивающихся в различных природных зонах и экотопах. Многолетние наблюдения за ним, проводимые на стационарных объектах, могут дать полезную информацию об особенностях сезонной и разногодичной динамики состояния биогеоценозов, а также о влиянии на них колебаний климата, являясь важным дополнением к временным рядам метеорологических данных.

Цель работы заключалась в выявлении закономерностей изменчивости температуры и влажности почв в различных лесных биогеоценозах Республики Марий Эл, а также отработке методики проведения измерений этих параметров.

Объекты и методика исследования. Объектами исследования послужили постоянные пробные площади, заложенные в различных экотопах заповедника «Большая Кокшага», лесопарка «Дубовая роща» и Ботанического сада-института ПГТУ. Замеры температуры выполнялись на глубине 5, 10, 20, 40, 60 и 80 см электронным термометром «Мини-щуп» с погрешностью ±0,1°С, а оценка влажности почв проводилась весовым методом с отбором образцов специальным буром. Полученный цифровой материал обработан на компьютере с использованием стандартных методов математической статистики и прикладных программ Excel и Statistica.

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ полученных данных показал, что температура разных слоев почвы изменялась на объектах исследования в течение вегетационного периода в довольно больших пределах, определяемых как погодными условиями того или иного года, так и особенностями экотопов (полноты и состава древостоев, типа почв, глубины залегания грунтовых вод и т.п.). Так, к примеру, в середине мая температура почвы на глубине 5 см варьировала от 6,5 до 14,1°С, на глубине 10 см – от 5,6 до 11,7°С, а на глубине 20 см – от 4,7 до 6,6°С (табл. 1). С увеличением глубины измеряемого слоя почвы предел изменений температуры постепенно уменьшался. В течение вегетационного периода размах значений рассматриваемого показателя в самых верхних слоях почвы составил 13,8-14,0°С, а в нижних – 10,3-11,5°С. В годы с прохладной и дождливой погодой вегетационного периода максимум температуры всех слоев почвы отмечался обычно в конце июля - начале августа, а с жаркой и засушливой погодой – во второй половине августа (рис. 1). Наиболее активное накопление суточных активных температур почвы выше 5°С происходило обычно в августе, а наименьшее – в мае, когда в отдельные годы их сумма приближалась к нулевой отметке (рис. 2) С увеличением глубины суммарное накопление тепла в почве, как свидетельствуют приведенные данные, постепенно уменьшалось.

Таблица 1

Пределы изменения температуры почвы на объектах исследования в 2010-2016 годах

Дата	Температура почвы в изученных экотопах на разной глубине, °С (min-max)					
	5 см	10 см	20 см	40 см	60 см	80 см
15.05	6,5-14,1	5,6-11,7	4,7-9,3	4,3-6,6	4,1-5,8	3,9-5,2
15.06	10,9-15,5	10,2-13,3	9,4-11,9	9,0-10,6	8,8-9,8	8,6-9,1
15.07	16,4-18,8	15,6-16,1	14,3-15,1	13,1-13,5	12,0-13,0	11,0-12,5
15.08	16,7-20,3	15,8-19,6	15,1-17,0	14,1-15,8	13,1-15,1	12,4-14,2
15.09	11,1-16,0	10,6-15,0	9,9-13,0	9,5-12,5	9,4-12,0	9,3-11,9
В целом за сезон	6,5-20,3	5,6-19,6	4,7-17,0	4,3-15,8	4,1-15,1	3,9-14,2
Размах	13,8	14,0	12,3	11,5	11,0	10,3

Характер изменения температуры почвы по градиенту её глубины в пределах одного и того же экотопа во многом зависел от погодных условий конкретных лет (рис. 3), а в пределах одного года – от особенностей экотопов (рис. 4), влияние которых сглаживалось в середине лета (рис. 5). Так, к примеру, 11 мая 2010 года в сосняке лишайниково-мшистом температура почвы на глубине 5 см составляла в среднем 15,5°С, а в пойменном экотопе на 5,8°С меньше (табл. 2). На глубине 10 см разница составляла уже 3,2°С, а на глубине от 20 до 40 см – всего 0,4°С. На верховых болотах в августе этого очень засушливого и жаркого года температура почвы на глубине 5 и 10 см в древостое с более высокой полнотой была на 1,3-1,5°С ниже. На глубине 20 см разница температуры снизилась до 0,5°С, а на глубине от 40 до 60 см – всего до 0,2°С.

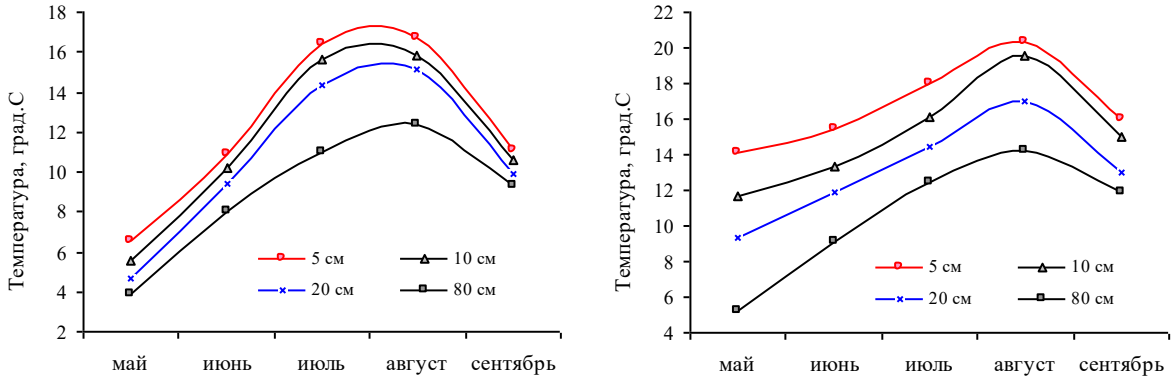


Рис. 1. Возможные варианты сезонной динамики температуры разных слоев почвы в лесах Марий Эл

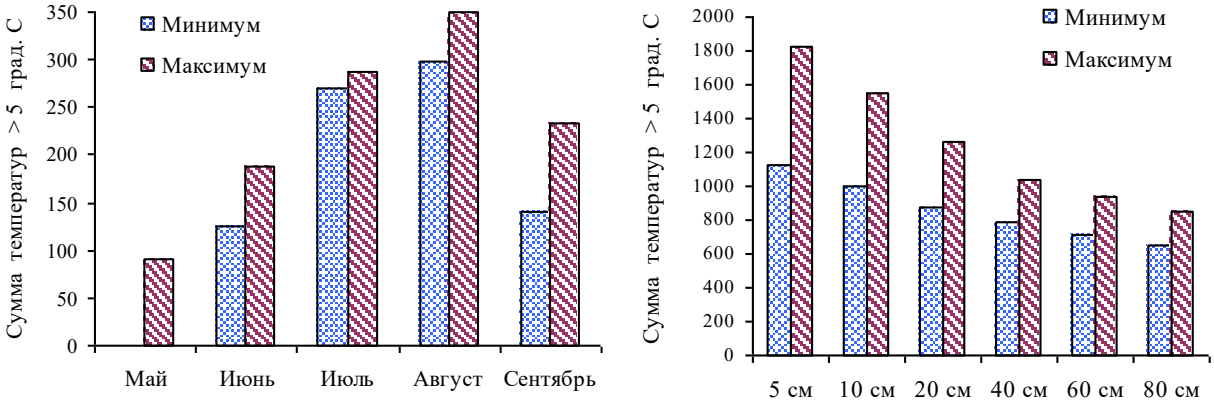


Рис. 2. Возможные варианты сезонной динамики суммы суточных активных температур почвы на глубине 20-40 см (слева) и суммы тепла, полученного разными слоя почвы в лесах Республики Марий Эл

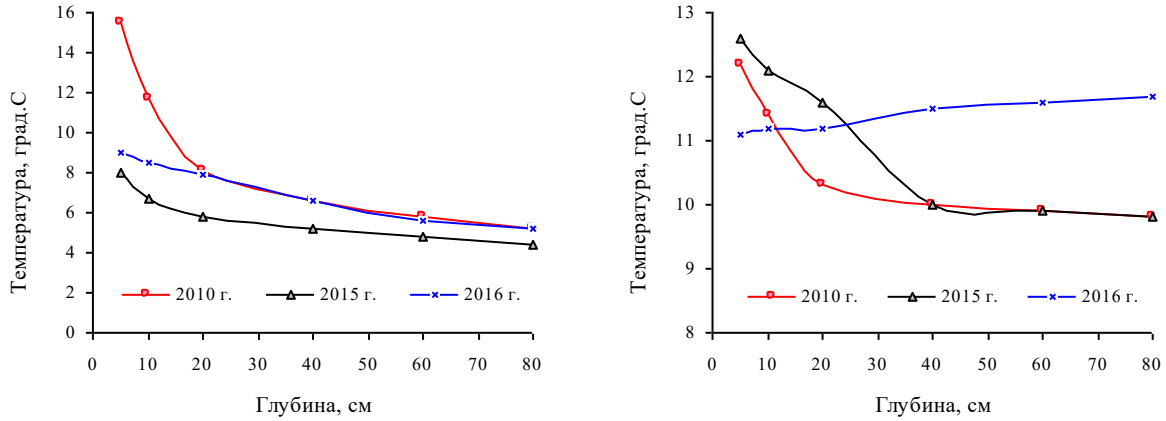


Рис. 3. Изменение температуры почвы по градиенту профиля в сосняке лишайниково-мшистом весной и осенью разных по погодным условиям вегетационных периодов

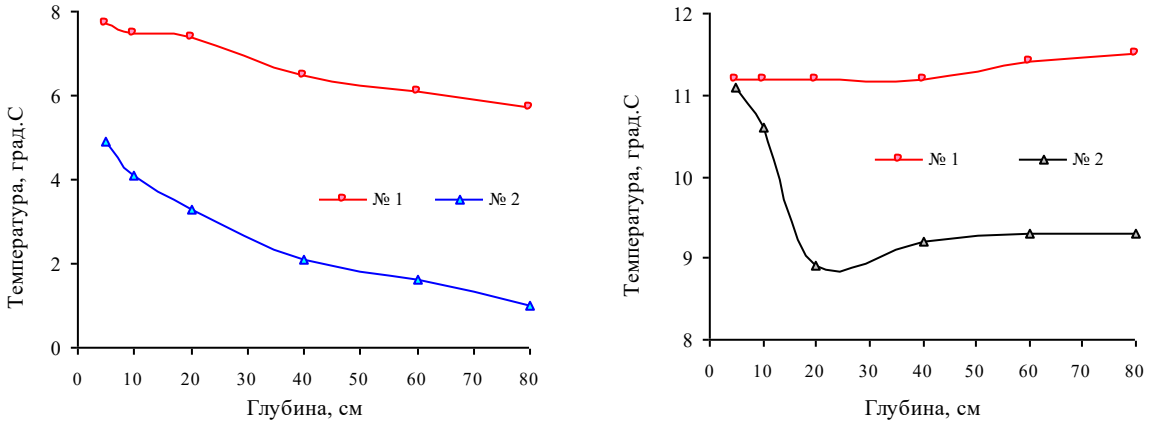


Рис. 4. Изменение температуры почвы по градиенту профиля весной и осенью 2016 года в различных экотопах: № 1 – сосняк лишайниковый, № 2 – липняк нагорный

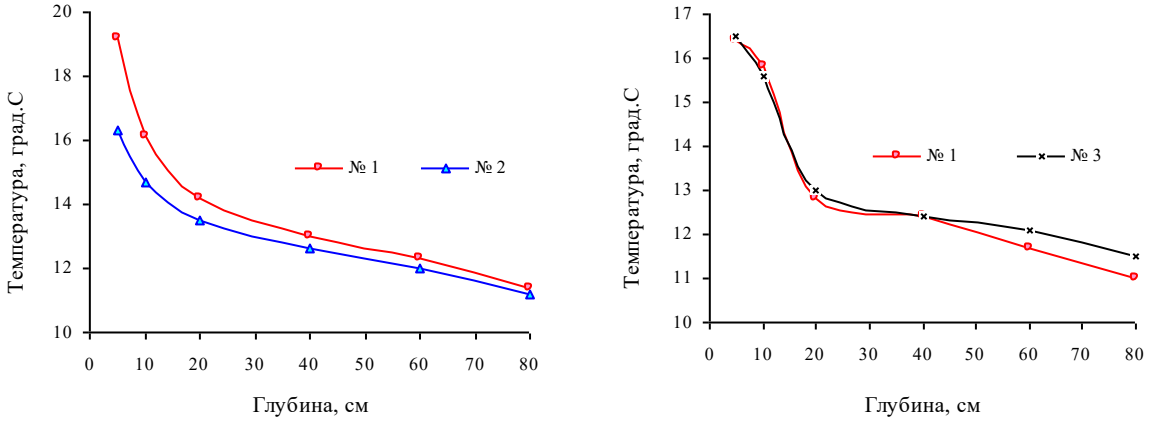


Рис. 5. Изменение температуры почвы по градиенту профиля в июле 2013 и 2016 годов в различных экотопах: № 1 – сосняк лишайниково-мшистый, № 2 – пойменный лес, № 3 – липняк нагорный

Таблица 2

Значения показателей температуры почвы на объектах исследования в 2010 году

Дата	Экотоп*	Температура почвы на разной глубине, °С					
		5 см	10 см	20 см	40 см	60 см	80 см
12.05	1	15,5	11,7	8,1	6,6	5,8	5,2
12.05	2	9,7	8,5	7,7	6,2	5,0	3,6
11.08	3	25,0	21,8	16,1	13,3	11,5	10,0
11.08	4	23,7	20,3	15,6	13,1	11,3	9,9

Примечание: *1 – 80-летний сосняк лишайниково-мшистый, 2 – 120-летний дубняк с липой и елью пойменный, 3 – низкополнотный климаксовый сосняк сфагновый на верховом болоте, 4 – 180-летний высокополнотный сосняк сфагновый на верховом болоте.

В пойменных экотопах лесопарка «Дубовая роща» температура верхних слоев почвы в июне 2014 года была наиболее высокой на лугу, прогреваемом солнцем почти весь день, а самой низкой – под пологом сомкнутого дубово-липового древостоя (табл. 3). Влияние степени сомкнутости древесного полога на температуру почвы четко прослеживается в 40-летних культурах сосны разной исходной густоты вплоть до глубины 80 см даже в начале осени (табл. 4). В сосняках лишайниково-мшистых очень большое влияние на температуру почвы оказывает напочвенный покров (табл. 5), который в этих экотопах развит очень сильно. Температура почвы в различных её слоях изменялась в пространстве экотопов не синхронно, что в равной степени проявляется как весной, так и осенью (рис. 6).

Таблица 3

Температура почвы в пойменных экотопах лесопарка «Дубовая роща» 05.06.2014 года

Глубина, см	Средняя температура почвы в различных экотопах, °С				
	ПП 1	ПП 2	ПП 3	ПП 4	ПП 5
10	16,8	15,1	14,0	14,1	14,0
20	13,7	13,4	12,8	12,8	12,1
Разность	3,1	1,7	1,2	1,3	1,9

Примечание: ПП 1 – луг, ПП 2 – 55-летние сомкнутые культуры лиственницы, ПП 3 – 63-летние сомкнутые культуры тополя, ПП 4 – 65-летний осинник, ПП 5 – сомкнутый спелый дубово-липовый древостой.

Таблица 4

Температура почвы 05.09.2016 года на опытном объекте в культурах сосны разной исходной густоты

Исходная густота, экз./га	Температура почвы на разной глубине, °С					
	5 см	10 см	20 см	40 см	60 см	80 см
500	15,3 ± 0,13	14,6 ± 0,13	13,9 ± 0,07	12,1 ± 0,06	11,9 ± 0,09	11,9 ± 0,07
1 тыс.	15,6 ± 0,09	14,7 ± 0,07	13,8 ± 0,03	11,8 ± 0,10	11,7 ± 0,12	11,4 ± 0,10
3 тыс.	14,9 ± 0,18	14,3 ± 0,16	13,6 ± 0,09	11,4 ± 0,11	11,4 ± 0,15	11,1 ± 0,07
5 тыс.	15,1 ± 0,09	14,5 ± 0,13	13,6 ± 0,09	11,5 ± 0,06	11,5 ± 0,03	11,3 ± 0,05
10 тыс.	14,1 ± 0,17	13,3 ± 0,14	13,0 ± 0,09	11,4 ± 0,14	11,0 ± 0,10	10,9 ± 0,16

Таблица 5

Влияние удаления напочвенного покрова на температурный режим почвы в сосняках заповедника

Дата	Вариант опыта*	Температура почвы на разной глубине, °С					
		5 см	10 см	20 см	40 см	60 см	80 см
80-летний сосняк лишайниковый							
16.06.2015 г.	1	16,6	15,5	14,2	11,6	10,4	9,4
	2	21,5	19,8	17,4	13,4	11,8	10,4
23.09.2015 г.	1	13,3	12,6	12,0	10,8	-	-
	2	15,3	14,1	12,7	10,9	-	-
12.05.2016 г.	1	7,7	7,5	7,4	6,5	6,1	5,7
	2	8,6	7,9	7,6	6,9	7,1	6,7
15.07.2016 г.	1	19,5	18,0	14,7	13,6	12,6	11,9
	2	22,9	21,8	16,3	14,5	13,1	12,4
14.09.2016 г.	1	11,2	11,2	11,2	11,2	11,4	11,5
	2	11,0	10,8	10,7	10,9	10,9	11,1
80-летний сосняк лишайниково-мшистый							
06.05.2015 г.	1	8,0	6,7	5,8	5,2	4,8	4,4
	2	10,7	9,0	7,5	6,2	5,9	5,4
16.06.2015 г.	1	14,1	13,3	12,7	10,8	9,8	9,1
	2	18,8	17,1	15,5	12,8	11,4	10,3
23.09.2015 г.	1	12,6	12,1	11,6	10,0	9,9	9,8
	2	14,5	13,6	12,4	10,5	10,1	10,0
12.05.2016 г.	1	9,0	8,5	7,9	6,6	5,6	5,2
	2	12,6	11,4	10,2	8,2	7,1	6,3
15.07.2016 г.	1	16,4	15,8	12,8	12,4	11,7	11,0
	2	18,9	17,8	14,1	13,2	12,3	11,7
14.09.2016 г.	1	11,1	11,2	11,2	11,5	11,6	11,7
	2	10,1	10,1	10,4	11,0	11,2	11,5

Примечание: *1 – площадки с напочвенным покровом, 2 – площадки с удаленным покровом.

Влажность почвы на объектах исследования изменялась в течение вегетационного периода также в очень больших пределах, обусловленных действием метеорологических и биоценотических факторов. Влажность суглинистых и глинистых почв изменялась от 11,5 до 62,0 %. Так, к примеру, влажность верхнего 10-см слоя почвы в пойменном дубово-еловолиповом древостое заповедника «Большая Кокшага» составляла 17.07.2013 года 26,6 %, 08.10.2013 г. – 62,0 %, а 28.05.2014 г. – 47 %. Влажность почвы на глубине 10-20 см составляла в последнем случае 29,7 %. Влажность почвы в пойменных экотопах лесопарка «Сосновая

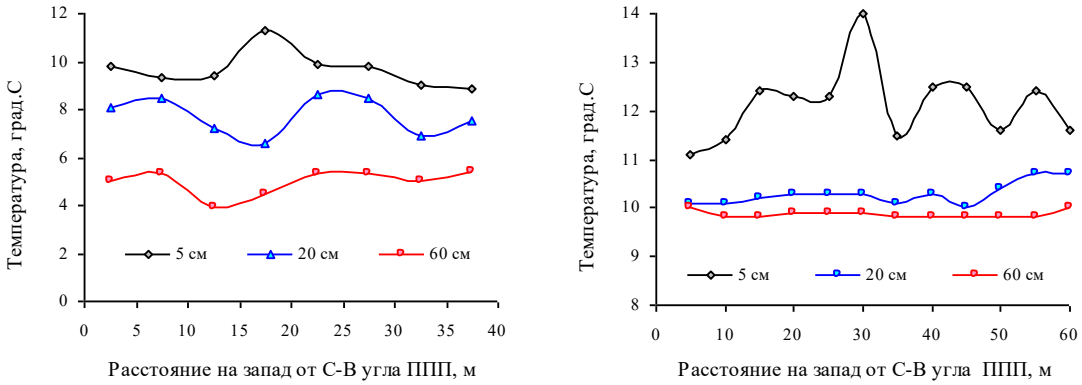


Рис. 6. Изменение температуры почвы на разной глубине в пределах профилей, заложенных в пойменном липняке с дубом крапивном 12.05.2010 года (слева) и сосняке лишайниково-мшистом 11.09.2010 года.

роща», оцененная весной 2016 года вскоре после схода половодья, варьировала от 8,6 до 24,1 % (табл. 6). Наиболее высока влажность верхнего и среднего слоев почвы была в смешанном лиственном лесу, а нижнего – на лугу. На песчаных почвах, которые обладают очень низкой влагоемкостью, её значения варьировали (в зависимости от глубины и времени взятия образца, а также условий экотопа) от 1,08 до 5,86 % по отношению к его воздушно-сухой массе.

Таблица 6

Влажность почвы в различных экотопах лесопарка «Сосновая роща» 18.05. 2016 года

Характеристика экотопа	Влажность различных слоев почвы, %		
	0-20 см	30-50 см	50-70 см
Пойменный луг на глинистой почве	17,2 ± 0,49	14,8 ± 0,49	17,7 ± 0,26
Смешанный лиственный лес на глинистой почве	24,1 ± 1,07	14,9 ± 0,94	17,0 ± 0,19
60-летние культуры сосны на супесчаной почве	19,1 ± 0,24	12,3 ± 0,14	8,6 ± 0,14

Характер изменения этого показателя по градиенту профиля почвы, имеющий в каждом экотопе свои особенности (рис. 7), коренным образом отличался от характера изменения её температуры, что обусловлено деятельностью корней растений, капиллярным подъемом грунтовых вод и инфильтрацией атмосферных осадков. Так, к примеру, влажность верхнего слоя глинистой почвы на глубине до 20 см в начале осени засушливого 2002 года на пойменных лугах была ниже, чем в лесных экотопах, особенно в 65-летнем осиннике. На глубине 20 -30 см она оказалась наиболее сухой в 50-летних культурах тополя бальзамического, на глубине от 30 до 60 см – в 45-летних культурах лиственницы сибирской, а глубже – в 65-летнем осиннике. На лугах же в начале лета почва была суше, чем в лесу, а осенью после выпадения обильных осадков, наоборот, влажнее (табл. 7).

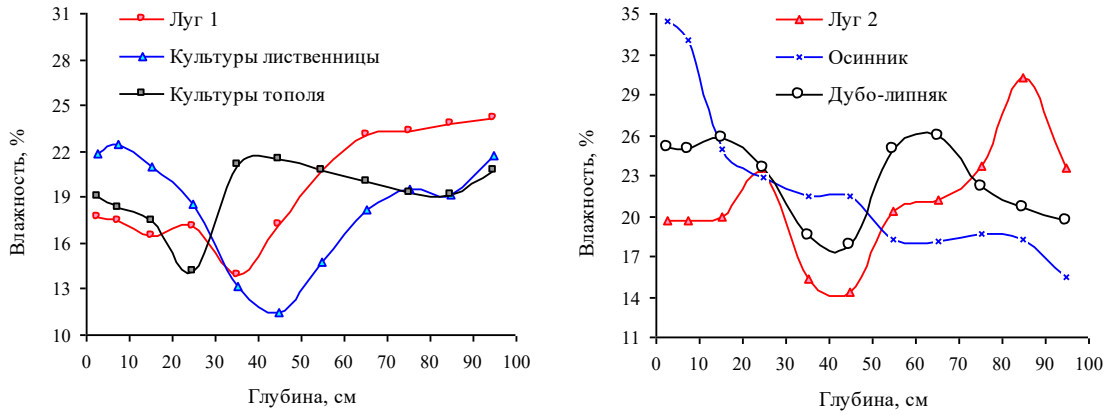


Рис. 7. Изменение влажности почвы по градиенту профиля 05.09.2002 года в различных экотопах лесопарка «Дубовая роща»

Таблица 7

Влажность почвы в различных экотопах лесопарка «Дубовая роща» в 2014 и 2016 годах

Слой почвы	Влажность почвы в различных экотопах, %				
	Луг	Культуры лиственницы	Культуры тополя	Осинник	Дубо-липняк
04.06. 2014 года					
0-5 см	16,7	18,8	19,3	22,5	25,6
5-10 см	15,4	14,0	17,1	16,9	19,1
В среднем	16,0	16,4	18,2	19,7	22,4
27.09. 2016 года					
0-20 см	35,2	не измеряли	не измеряли	28,9	30,2
30-50 см	17,4	не измеряли	не измеряли	12,3	14,3
50-70 см	16,5	не измеряли	не измеряли	11,5	13,1

В лесных экотопах Ботанического сада-института Поволжского государственного технологического университета ранней весной вскоре после схода снега влажность верхнего слоя глинистой почвы изменялась от 35,5 до 39,7 %, слоя почвы 30-50 см – от 20,0 до 21,2 %, 50-70 см – от 19,1 до 20,2 % (табл. 8). К середине лета в березняке снытьево-пролесниковом она во всех слоях увеличилась за счет притока грунтовых вод на 0,5-2,2 %. В липняке же, где этот приток отсутствовал, влажность верхнего слоя практически не изменилась, а нижних уменьшилась на 4,6-4,7 %. К осени в верхнем слое она понизилась в обоих экотопах на 8,9-9,2 %, в нижних слоях под пологом липняка практически не изменилась, а под пологом березняка уменьшилась на 6,5-7,7 %.

Таблица 8

Сезонная динамика влажности почвы в различных экотопах Ботанического сада ПГТУ в 2016 году

Экотоп	Дата учета	Влажность разных слоев почвы, %		
		0-20 см	30-50 см	50-70 см
80-летний липняк с елью снытьево-пролесниковый	21.04.2016 г.	35,5 ± 1,15	20,0 ± 0,42	19,1 ± 0,55
	06.07.2016 г.	35,1 ± 0,64	15,3 ± 0,43	14,4 ± 0,11
	23.09.2016 г.	26,2 ± 0,96	14,7± 0,53	14,1± 1,29
80-летний березняк с липой снытьево-пролесниковый	21.04.2016 г.	39,7 ± 1,72	21,2 ± 0,83	20,2 ± 0,55
	06.07.2016 г.	41,9 ± 3,32	22,2 ± 1,61	20,7 ± 0,84
	23.09.2016 г.	32,7± 1,62	14,5± 0,40	14,3± 0,42

Величина влажности почвы в определенной степени зависела, как показали исследования, от густоты древостоя, определяющего степень сомкнутости полога леса, который через задержание атмосферных осадков и транспирацию влаги определяет величину водного баланса в биогеоценозе. Так, на опытном объекте в 40-летних культурах сосны, заложенных в лишайниковом типе леса, наиболее влажным в начале осени верхний слой почвы был в варианте с самой низкой их исходной густотой, постепенно снижаясь по мере ее увеличения (табл. 9).

Таблица 9

Влажность почвы 05.09 2016 года на опытном объекте в культурах сосны разной исходной густоты

Слой почвы	Влажность почвы в вариантах разной густоты, %				
	0,5 тыс. экз. /га	1 тыс. экз./га	3 тыс. экз./га	5 тыс. экз./га	10 тыс. экз./га
0-20 см	5,11	3,83	3,67	2,01	2,79
30-50 см	1,32	1,39	1,70	1,13	1,35
50-70 см	1,39	1,21	1,08	1,20	1,54

С увеличением глубины почвы картина кардинально изменялась: влажность слоя почвы 30-50 см наивысшей была в варианте с исходной густотой 3 тыс. экз./га, а самой низкой – в варианте 5 тыс. экз./га, что связано с характером вертикального распределения корней деревьев и интенсивностью испарения влаги древостоем. Влажность слоя почвы 50-70 см наивысшей была в варианте с исходной густотой 10 тыс. экз./га, а самой низкой – в варианте 3 тыс. экз./га. Наибольшее снижение влажности между слоем почвы 0-20 см и 30-50 см произошло в самых редких культурах, а наименьшее – в варианте с густотой 5 тыс. экз./га.

В 80-летнем сосняке лишайниковом влажность разных слоев почвы изменялась в течение вегетационного периода от 2,02 до 5,86 %, а сосняке лишайниково-мшистом – от 2,00 до 5,62 % (табл. 10), составляя в среднем в первом экотопе 3,47 %, а во втором 3,81 %. Весной влажность верхнего слоя почвы за счет снеготаяния увеличивалась по сравнению с осенью в сосняке лишайниковом на 0,64 %, а в сосняке лишайниково-мшистом с более мощным напочвенным покровом она, наоборот, уменьшилась на 0,45 % за счет жизнедеятельности корней деревьев. На площадках с удаленным напочвенным покровом в первом экотопе она возросла на 2,33 %, а во втором уменьшилась на 1,37 %. Влажность слоя почвы 30-50 см в первом экотопе уменьшилась по сравнению с осенью на площадках с ненарушенным напочвенным покровом на 0,34 %, а с удаленным - на 0,24 %. Во втором экотопе снижение влажности на площадках с ненарушенным напочвенным покровом было более значительным, составив 0,51 %. На площадках же с удаленным покровом влажность почвы, наоборот, увеличилась на 0,39 %. Влажность слоя почвы 50-70 см в сосняке лишайниковом на площадках с ненарушенным покровом увеличилась на 0,04 %, а с удаленным снизилась на 0,56 %. В сосняке лишайниково-мшистом влажность этого слоя почвы увеличилась на 0,82 и 1,41 % соответственно. С мая по июль влажность почвы в обоих экотопах снижалась, что особенно четко проявилось в засушливом 2016 году. На площадках с ненарушенным напочвенным покровом в сосняке лишайниковом она снизилась на 1,41, 1,28 и 1,19 %, а с удаленным – на 2,13, 0,73 и 0,74 %. Во втором экотопе на площадках с ненарушенным напочвенным покровом снижение составило 1,23, 2,00 и 1,95 %, а с удаленным – 0,23, 2,50 и 1,55 %. С июня по сентябрь в прохладном и дождливом 2015 году влажность почвы в сосняке лишайниковом на площадках с ненарушенным напочвенным покровом увеличилась в среднем на 1,51 %, а в сосняке лишайниково-мшистом – только на 0,93 %. На площадках же с удаленным покровом она увеличилась на 0,79 и 1,32 % соответственно. В засушливом и жарком 2016 году влажность почвы увеличилась за счет обильных осадков, прошедших в конце августа и начале сентября, в первом случае на 1,28 и 2,05 %, а во втором – на 0,72 и 1,55 % соответственно. Роль лишайникового и мохового покрова в сосняках, таким образом, далеко не однозначна. Он, с одной стороны, задерживает поступление в почву осадков и испаряет их в процессе своей жизнедеятельности, а с другой – способствует сохранению влаги во время жары.

Таблица 10

Динамика влажности почвы в 80-летних сосняках заповедника «Большая Кокшага»

Дата учета	Влажность различных слоев почвы в экотопах, %					
	Сосняк лишайниковый			Сосняк лишайниково-мшистый		
	0-20 см	30-50 см	50-70 см	0-20 см	30-50 см	50-70 см
На площадках с ненарушенным напочвенным покровом						
16.06. 2015 г.	2,02	2,83	2,16	4,07	3,11	3,41
23.09. 2015 г.	4,14	4,02	3,37	5,48	4,76	3,13
12.05. 2016 г.	4,78	3,68	3,41	5,02	4,25	3,95
15.07. 2016 г.	3,37	2,40	2,22	3,80	2,25	2,00
14.09. 2016 г.	4,14	4,02	3,70	5,48	4,76	3,95
На площадках с удаленным напочвенным покровом						
16.06. 2015 г.	2,88	3,27	2,83	3,36	2,51	2,50
23.09. 2015 г.	3,52	4,02	3,81	5,62	4,14	2,56
12.05. 2016 г.	5,86	3,78	3,25	4,25	4,53	3,97
15.07. 2016 г.	3,73	3,06	2,50	4,02	2,03	2,42
14.09. 2016 г.	3,52	4,02	3,91	5,62	4,14	3,35

Важным этапом работы являлось изучение пространственной вариабельности температуры и влажности почвы для обоснования необходимого числа измерений, обеспечивающих приемлемую точность их оценки. Исследования показали, что температурный фон почв в изученных экотопах довольно неоднороден. Так, в мае 2010 года температура почвы в сосняке лишайниково-мшистом изменялась под слоем подстилки на глубине 5 см от 11,6 до

20,5°С (Демаков, Исаев, 2013), что связано с неоднородностью полога древостоя, рельефа и напочвенного покрова. В пойменном же дубово-елово-липовом древостое значения показателя варьировали всего лишь в пределах от 8,9 до 11,3°С. Установлено, что максимальная величина коэффициента вариации температуры почвы не превышает во всех экотопах 15,8 %. В сосняках на песчаных и торфянистых почвах она быстро уменьшается по градиенту профиля, стабилизируясь уже с отметки 20-30 см. В пойменных же экотопах значения этого показателя с глубиной обычно увеличиваются, что связано с действием паводковых и грунтовых вод. Максимальная же величина коэффициента вариации влажности почвы в пределах всего вертикального градиента не превышает 14,7 %. На основе этих значений можно по формуле $N = (V/p)^2$ определить число измерений, необходимое для достижения требуемой точности оценки среднего значения параметра. Расчеты показали, что для достижения ± 10 %-ной точности оценки с вероятностью 95 % необходимо провести не более 3 измерений, а ± 5 %-ной – не более 10.

Заключение. Результаты проведенных нами исследований позволили в первом приближении определить пределы и закономерности пространственно-временной изменчивости температуры и влажности почвы в различных экотопах Республики Марий Эл. Установлено, что микроклимат почв зависит от их гранулометрического состава, характера и толщины напочвенного покрова, полноты и состава древостоя. Для глубокого понимания роли микроклимата почв в функционировании лесных биогеоценозов необходимо организовать во всех заповедниках, национальных парках и ботанических садах регулярные наблюдения за температурой и влажностью почв, которые помогут оценить реакцию на них биоты и выявить существующие тенденции изменения климата. Эти наблюдения целесообразно проводить на стационарных объектах, резко различающихся между собой по экологическим условиям, проводя измерения данных параметров трижды за сезон (в середине мая, июля и сентября) на глубине 0-20, 30-50 и 50-70 см в 3-5 точках.

Библиографический список

1. Архангельская, Т.А. Закономерности пространственного распределения температуры почв в комплексном почвенном покрове: автореф. дис. … д-ра биол. наук / Т.А. Архангельская. – М., 2008. – 50 с.
2. Битюков, Н.А. Температурный режим бурых лесных почв под букняками / Н.А. Битюков // Известия Сочинского государственного университета. – 2012. – № 3 (21). – С. 219-223.
3. Галенко, Э.П. Формирование теплового режима почв хвойных экосистем бореальной зоны в зависимости от лесообразующей породы и типа леса / Э.П. Галенко // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2013. – Вып. 1 (13). – С. 32-37.
4. Демаков, Ю.П. Пространственное изменение температуры почвы в суходольных и пойменных биогеоценозах / Ю.П. Демаков, А.В. Исаев // Научные труды государственного природного заповедника «Большая Кокшага». Вып. 6. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2013. С. 39-47.
5. Десяткин, Р.В. Температурный режим мерзлотно-таежных почв Центральной Якутии / Р.В. Десяткин, А.Р. Десяткин, П.П. Федоров // Криосфера Земли. – 2012. – Т. XVI, № 2. – С. 70-78.
6. Клинцов, А. П. Температурный режим почвы каменно-березовых лесов Центрального Сахалина / А.П. Клинцов // Лесоведение. – 1988. – № 6. – С. 11-17.
7. Кононенко, А.В. Гидротермический режим таежных и притундровых почв европейского северо-востока / А.В. Кононенко. – Л.: Наука, 1986. – 144 с.
8. Коротаев, А.А. Влияние температуры и влажности почвы на рост корней в культурах хвойных пород / А.А. Коротаев // Лесоведение. – 1987. – № 2. – С. 50-58.
9. Молчанов, А.А. Лес и климат / А.А. Молчанов. – М.: АН СССР, 1961. – 247 с.
10. Орлов, А.Я. Температура почвы и производительность почвы / А.Я. Орлов // Доклады АН СССР. – 1953. – Т. 12, № 4. – С. 957-960.
11. Татаринцев, Л.М. Природная динамика физических и теплофизических свойств почв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3 (19). – С. 36-41.
12. Шульгин, А.М. Климат почвы и его регулирование / А.М. Шульгин. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 341 с.

УДК 630*181:581.5

ВОЗРАСТНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ ПО ТИПАМ ЛЕСОРАСТИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

В.К. Хлюстов [1], А.В. Лебедев [1, 2]
[1] ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева
[2] ФГБУ «Государственный заповедник «Кологривский лес»

Представлены модели чистой первичной продукции фракций фитомассы сосновых древостоев европейской части России. Показаны возрастные изменения и фракционная структура чистой первичной продукции и общей продуктивности фитомассы сосновых древостоев Костромской области по типам лесорастительных условий. Изложенные в статье методические положения получения регрессионных моделей и лесотипологических кривых роста позволяют глубже оценить и дополнить существующие представления о продукционном процессе лесных экосистем.

Ключевые слова: *биологическая продуктивность, чистая первичная продукция, фитомасса, сосновые древостои, тип лесорастительных условий.*

NET PRIMARY PRODUCTION OF PINE STANDS BY TYPE OF FOREST GROWTH CONDITIONS

V. K. Khlustov [1], A. V. Lebedev, [1, 2]
[1] Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy
[2] State natural reserve "Kologrivsky les"

The article presents the model of net primary production of phytomass fractions in the pine stands of the European part of Russia. Examines age trends in changes and fractional structure of the net primary production of pine stands in Kostroma region by types of forest growing conditions. The presented methodical aspects of obtaining of regression models and forest typological growth curves allow deeper assessment and complement to the existing ideas about the production process of forest ecosystems.

Keywords: *biological productivity, net primary production, standing crops, pine forest, Kostroma region, type of site and stand conditions.*

Введение. Сосна является одной из основных лесообразующих пород Костромской области. Она произрастает на площади 1013 тыс. га (23,3%) и уступает лишь березе и ели. Закономерности биологической продуктивности древостоев области слабо изучены, а вопросу возрастных изменений отдельных фракций фитомассы на лесотипологической основе посвящены единичные работы последних лет (Хлюстов и др. 2015а; Хлюстов и др. 2016).

В последние десятилетия в нашей стране проводится большое количество исследований, посвященных изучению биологической продуктивности лесов, в том числе связанных с оценкой их роли в глобальных экологических циклах и регуляции климата (Хлюстов, Лебедев, 2013; Хлюстов и др., 2015б; Курбанов и др., 2008; Курбанов, 2009).

Для познания продукционного процесса лесных экосистем особенно важным становится выявление закономерности формирования валовой чистой продукции и чистой первичной продукции, величины которых зависят от многих факторов: почвенно-экологических условий, климатических условий, биологических особенностей древесных растений и др. С величиной чистой первичной продукции связаны экологический потенциал и материально-энергетические связи лесного покрова, биосферные функции леса (Уткин и др., 2005, Курба-

нов и др., 2010). Накопленная величина чистой первичной продукции древостоя от времени его существования до заданного возраста *A* представляет собой величину общей продуктивности фитомассы.

Целью работы являлось моделирование и выявление закономерностей возрастного изменения чистой первичной продукции и общей продуктивности фитомассы сосновых древостоев по типам лесорастительных условий.

Материал и методика исследований. Суммарный объем органического вещества, которое образуется в результате фотосинтеза, называется валовой чистой продукцией (Gross Primary Production, GPP). Часть этого органического вещества теряется в результате процессов метаболизма, вследствие которых происходит выделение в атмосферу углекислого газа. Этот энергетический поток называется автотрофным дыханием (R) и может составлять 40-70% от валовой чистой продукции растения. Разность между валовой чистой продукцией (GPP) и энергетическими потерями на автотрофное дыхание (R) называется чистой первичной продукцией (Net Primary Production, NPP):

$$NPP = GPP - R \ . \quad (1)$$

Определение величины чистой первичной продукции по уравнению (1) затруднено из-за неопределенности, связанной с оценкой величины автотрофного дыхания. Имеется ряд исследований, посвященных определению величины автотрофного дыхания, которые привели к определенному прогрессу в данном вопросе: например, стоит отметить работы S. Linder и E. Troeng (1981), M.G. Ryan (1991; 1995). При этом подходе к изучению чистой первичной продукции важно учитывать энергетические затраты на рост и дыхание различных органов древесных растений (ствол, ассимиляционный аппарат, ветви, корни), содержание азота в органах растений, температуру окружающей среды, от которой зависит скорость протекания биохимических реакций (Waring et al, 1998).

Другой подход определения NPP заключается в том, что чистая первичная продукция представляет собой величину фитомассы, произведенной за единицу времени:

$$NPP = \Delta Ph + losses \ , \quad (2)$$

где ΔPh - наличная фитомасса, произведенная за промежуток времени; *losses* - потери от произведенной фитомассы.

В соответствии с данным подходом провести определение величины чистой первичной продукции намного проще. Алгоритм работ сводится к измерению величины наличной фитомассы и определению величины потери фитомассы в результате процессов отпада и опада. За время роста любого древостоя происходит отмирание части деревьев, что связано с конкуренцией за ресурсы окружающей среды. Отмирающая древесина представляет собой поток фитомассы, которая формирует пул мертвой древесины (отпад). Опад представляет собой поток фитомассы отмирающих частей деревьев (хвоя, ветви, отслоившиеся фрагменты коры, шишки и т.д.). Но если определить величину NPP наземных фракций фитомассы можно более или менее точно, то оценки чистой первичной продукции фракции корней являются грубыми и приближенными (Waring et al, 1998).

Получение фактических данных о чистой первичной продукции насаждений, а тем более о валовой первичной продукции является в несколько раз более сложной задачей, чем оценка запасов наличной фитомассы. По этой причине для оценки чистой первичной продукции сосновых древостоев европейской части России были использованы данные только 113 пробных площадей (Усольцев, 2010), что в 5 раз меньше, чем данных по наличной фитомассе.

Охват пробными площадями европейской части России и распределение их числа по регионам приводятся на рисунке 1. На подавляющее большинство регионов приходится менее

чем по 10 пробных площадей (суммарно 37,2% от общего количества), лишь только на Республику Карелию приходится 58 пробных площадей (51,3%) и на Ярославскую область - 13 пробных площадей (11,5%).

Наилучший результат по аппроксимации чистой первичной продукции показало уравнение, включающее в себя наличную фитомассу и возраст древостоя:

$$Z_{PM_i} = N \cdot \exp\left(d_o + d_1 lnA + d_2 \ln\left(\frac{PM_i}{N}\right)\right), \quad (3)$$

где Z_{PMi} – годовая NPP i-ой фракции, т·га$^{-1}$·год$^{-1}$; N – число стволов, шт.·га$^{-1}$; PM_i – фитомасса i-ой фракции, т; A – возраст древостоя, лет; d – параметры модели.

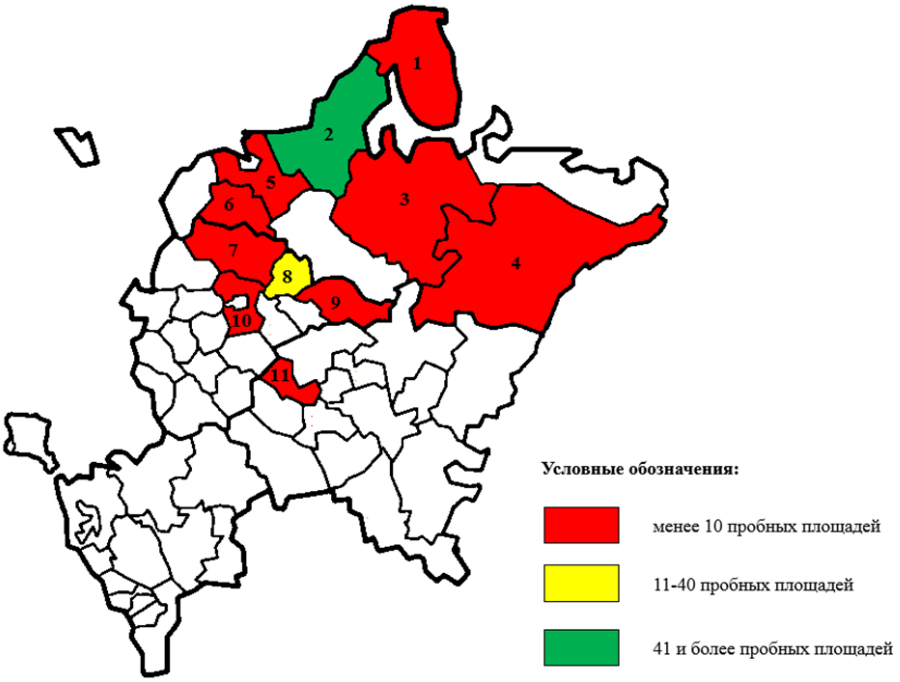


Рис. 1. Распределение числа пробных площадей по регионам европейской части России: 1 – Мурманская обл., 2 – Респ. Карелия, 3 – Архангельская обл., 4 – Респ. Коми, 5 – Ленинградская обл., 6 – Новгородская обл., 7 – Тверская обл., 8 – Ярославская обл., 9 – Костромская обл., 10 – Московская обл., 11 – Респ. Мордовия

Оценки параметров уравнения (3) получены методом наименьших квадратов. Параметры регрессионных уравнений чистой первичной продукции фракций (ствол в коре, кора ствола, ветви, хвоя, корни) и их статистическая значимость приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры моделей годовой чистой первичной продукции фитомассы и их достоверность

Фракция	Коэффициент регрессии	Значение коэффициента	t-значение	Значимость t	R^2
Ствол в коре	d_0	-0,50473	-1,3	0,202	0,926
	d_1	-0,83137	-10,9	0,000	
	d_2	0,90731	32,5	0,000	
Кора ствола	d_0	-0,55674	-0,7	0,462	0,883
	d_1	-0,87213	-7,0	0,000	
	d_2	0,91754	18,7	0,000	
Ветви	d_0	-0,32387	-0,5	0,643	0,821
	d_1	-0,60398	-5,2	0,000	
	d_2	0,93801	19,2	0,000	
Хвоя	d_0	0,26256	0,6	0,570	0,919
	d_1	-0,23915	-3,5	0,001	
	d_2	1,06661	29,3	0,000	
Корни	d_0	-0,06690	-0,1	0,932	0,805
	d_1	-0,93687	-7,0	0,000	
	d_2	0,89823	16,1	0,000	

Все полученные уравнения являются достоверными и позволяют охватить от 80,5% до 92,6% вариации зависимой переменной. Для уравнений чистой первичной продукции ствола в коре ($R^2=0,982$) и чистой первичной продукции хвои ($R^2=0,972$) получено наибольшее соответствие значений NPP, рассчитанных по модели, исходным данным. Численные коэффициенты перед переменными возраста и наличной фитомассы являются статистически значимыми на 5%-ом уровне значимости ($t_{расч}>t_{05}\approx1,96$).

Сочетание полученных уравнений зависимости NPP от возраста и наличной фитомассы фракций древостоя с данными таблиц хода роста сосновых древостоев Костромской области по типам лесорастительных условий (Хлюстов, Лебедев, 2013; Хлюстов и др., 2016) и с моделями наличной фитомассы фракций сосновых древостоев европейской части России (Хлюстов и др., 2015) позволило получить лесотипологические кривые возрастного изменения чистой первичной продукции и общей продуктивности фитомассы сосновых древостоев Костромской области.

Результаты и их обсуждение. Изменение с возрастом годовой чистой первичной продукции чистых сомкнутых сосновых древостоев области показано на рисунке 2. В зависимости от почвенно-типологических условий изменяется возраст кульминации кривых чистой первичной продукции. Изменение возраста кульминации кривых прослеживается как по градиентам влажности почв, так и по градиентам трофности. Так, например, в мезогигрофильных условиях на относительно богатых почвах возраст кульминации кривых составляет 35 лет, на относительно бедных почвах – 40 лет, а на бедных боровых почвах – 45 лет. На боровых почвах увеличение возраста кульминации кривых чистой первичной продукции прослеживается при снижении и нарастании почвенного увлажнения относительно оптимального значения в мезогигрофильных и мезофильных условиях. Минимальным возрастом кульминации кривых чистой первичной продукции характеризуются мезофильные и мезогигрофильные боры, при движении по гигрогенному ряду в сторону ксерофильных условий возраст кульминации увеличивается до 50 лет, а при движении в сторону избыточного переувлажнения – увеличивается до 60 лет.

Наибольший интерес представляют величины чистой первичной продукции ассимиляционного аппарата и корневой системы. С работой ассимиляционного аппарата связаны процессы образования органического вещества в результате фотосинтеза, корневая система обеспечивает поступление в растения воды, необходимой для протекания биохимических реакций. В зависимости от почвенно-грунтовых условий возраст кульминации кривых чистой первичной продукции хвои варьирует в диапазоне от 20 до 30 лет, а возраст кульминации кривых NPP корней варьирует в диапазоне от 30 лет в лучших условиях до 60 лет в худших условиях. В среднем величина чистой первичной продукции хвои для чистых сомкнутых сосновых древостоев составляет 0,43 т на 1 га в год, а для корней – 0,71 т на 1 га в год.

На рисунках 3 и 4 представлены возрастные изменения фракционной структуры чистой первичной продукции чистых сомкнутых сосновых древостоев в ультра-гигрофильных борах (худшие условия) и мезогигрофильных сложных суборях (лучшие условия). Наибольший вклад в чистую первичную продукцию древостоев вносит стволовая фракция без коры. С увеличением возраста древостоя происходит закономерное снижение доли чистой первичной продукции:

- хвои с 30% в возрасте 10 лет до 13% в возрасте 100 лет в ультра-гигрофильных борах и с 18% в возрасте 10 лет до 9% в возрасте 100 лет в мезогигрофильных сложных суборях;
- коры стволов с 10% в возрасте 10 лет до 5% в возрасте 100 лет в ультра-гигрофильных борах и с 9% в возрасте 10 лет до 5% в возрасте 100 лет в мезогигрофильных сложных суборях.

Доля чистой первичной продукции корней и ветвей с возрастом изменяется незначительно. В ультрагигрофильных борах на NPP фракции корней приходится около 16%, а в мезогигрофильных сложных суборях – 16-17%. На NPP фракции ветвей в ультрагигрофильных борах приходится 19-21%, а в мезогигрофильных сложных суборях – 18-19%.

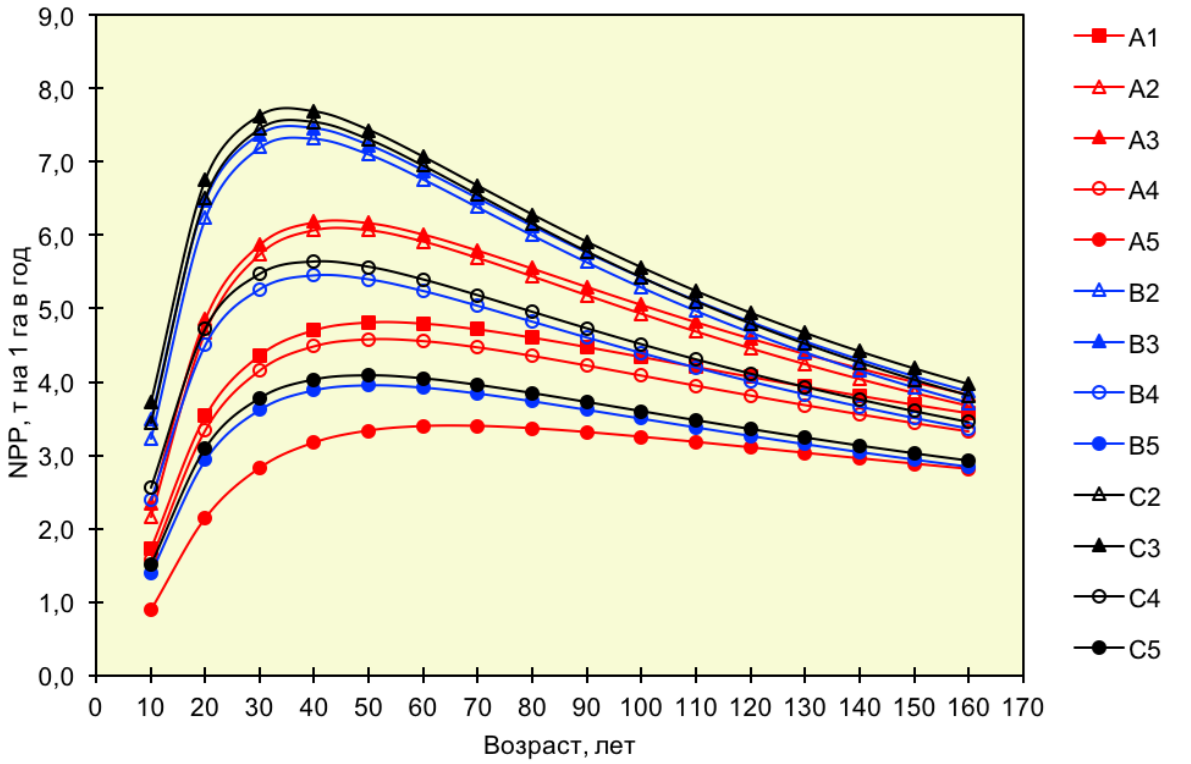


Рис. 2. Изменение с возрастом годовой чистой первичной продукции чистых сомкнутых сосновых древостоев Костромской области по типам лесорастительных условий

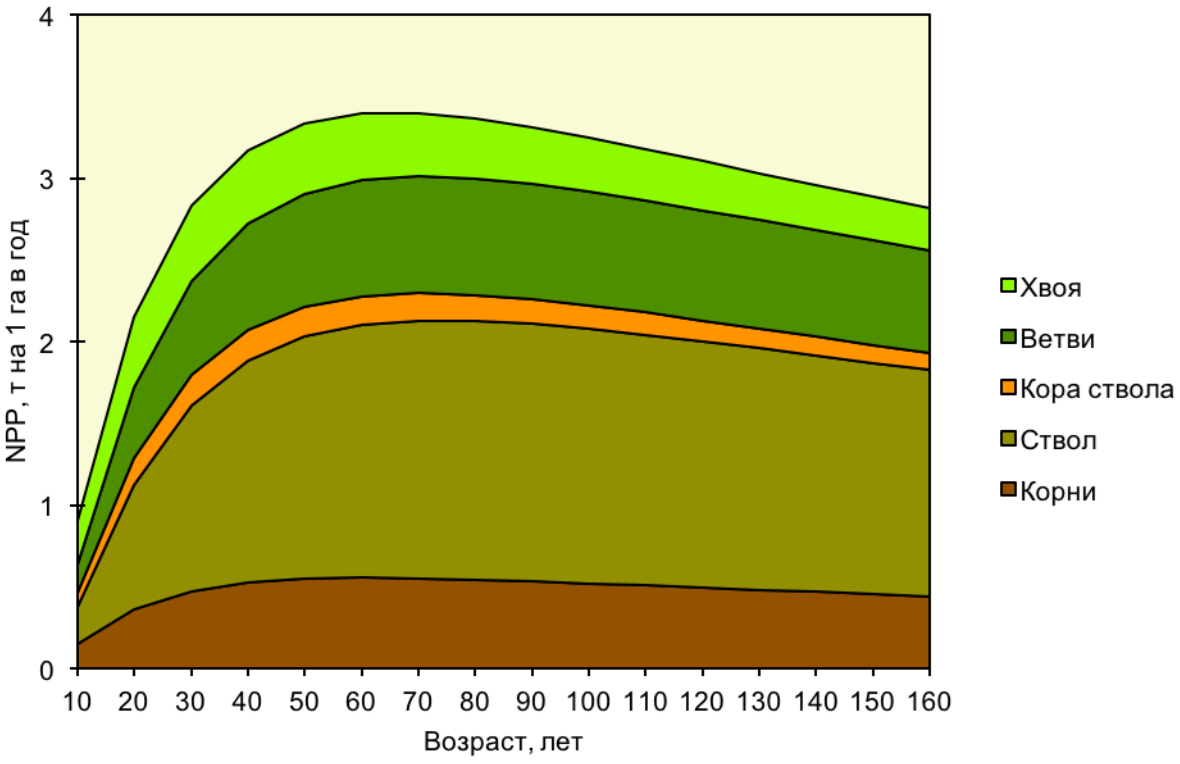


Рис. 3. Возрастное изменение фракционной структуры годовой чистой первичной продукции чистых сомкнутых сосновых древостоев в ультрагигрофильных борах (ТЛУ- A_5)

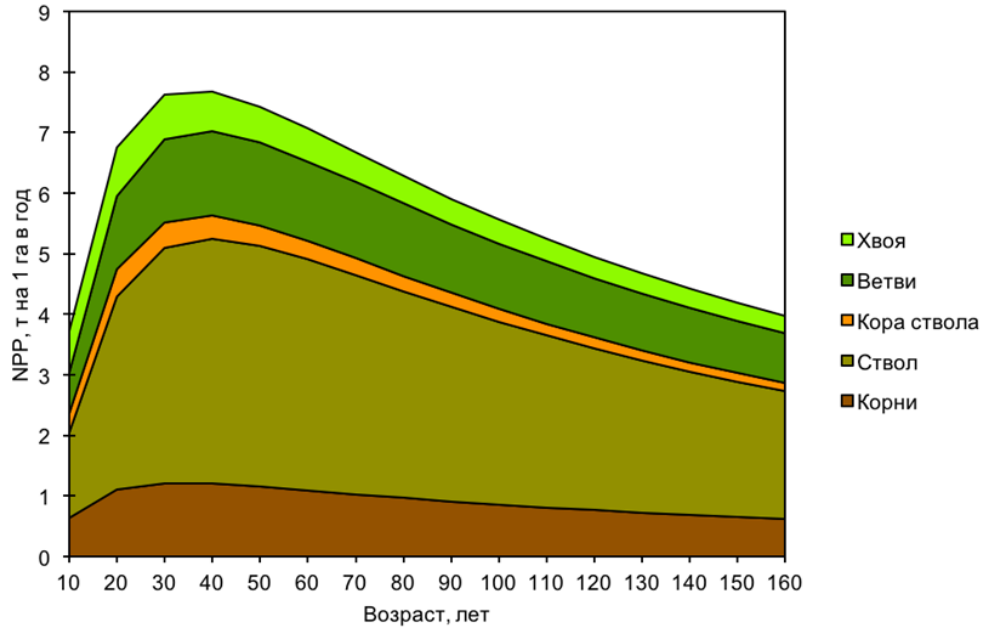


Рис. 4. Возрастное изменение фракционной структуры годовой чистой первичной продукции чистых сомкнутых сосновых древостоев в мезогигрофильных сложных суборях (ТЛУ- C_3)

Как было отмечено выше, интеграл по возрасту от функции чистой первичной продукции позволяет перейти к оценке общей продуктивности фитомассы древостоя. На рисунке 5 показано изменение с возрастом общей продуктивности фитомассы чистых сомкнутых сосновых древостоев по типам лесорастительных условий. Наибольшая общая продуктивность достигается в мезогигрофильных сложных суборях и в возрасте 50 лет составляет 330 т на 1 га, а в возрасте 100 лет – 650 т на 1 га. В худших почвенно-экологических условиях в ультрагигрофильных борах общая продуктивность фитомассы в возрасте 50 лет составляет 120 т на 1 га, а в возрасте 100 лет – 290 т на 1 га. Таким образом, амплитуда общей продуктивности между лучшими и худшими почвенно-грунтовыми условиями для древостоев в возрасте 100 лет составляет 360 т на 1 га.

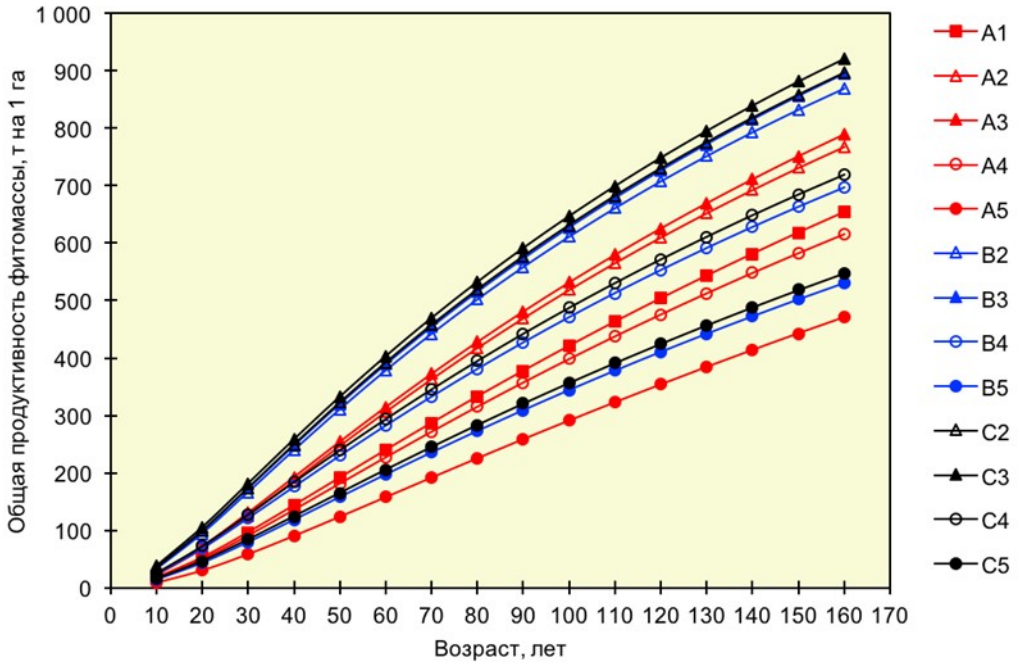


Рис. 5. Изменение с возрастом общей продуктивности фитомассы чистых сомкнутых сосновых древостоев по типам лесорастительных условий Костромской области

На рисунках 6 и 7 показано изменение с возрастом фракционной структуры общей продуктивности фитомассы чистых сомкнутых сосновых древостоев в ультра-гигрофильных борах и в мезо-гигрофильных сложных суборях. Наибольший вклад в общую продуктивность фитомассы вкладывает фракция стволов без коры. В ультрагигрофильных борах в возрасте спелости древостоев на стволовую фракцию приходится около 48-49% общей продуктивности фитомассы, а в мезогигрофильных сложных суборях – около 53-54%.

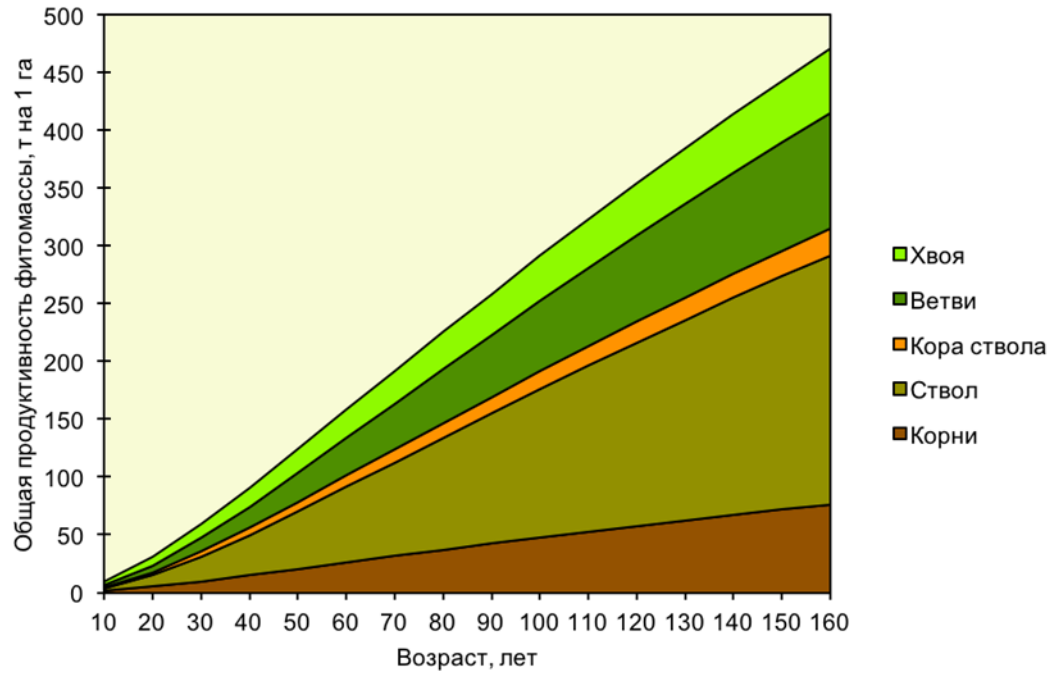


Рис. 6. Возрастное изменение фракционной структуры общей продуктивности фитомассы чистых сомкнутых сосновых древостоев в ультрагигрофильных борах (ТЛУ- А5)

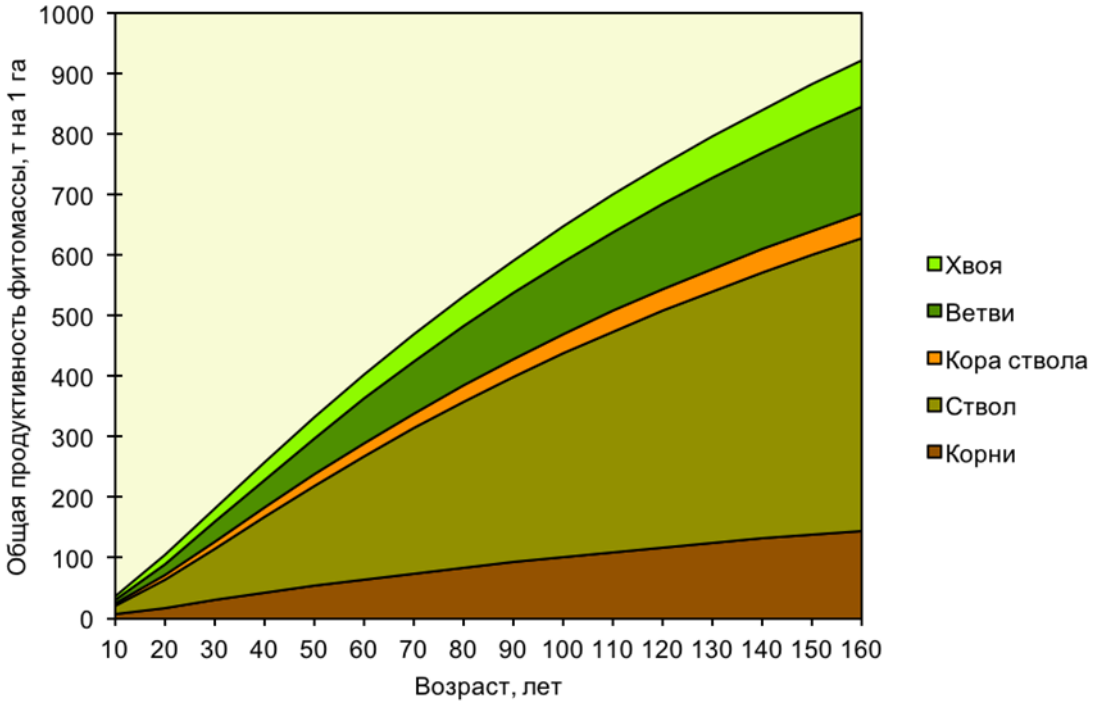


Рис. 7. Возрастное изменение фракционной структуры общей продуктивности фитомассы чистых сомкнутых сосновых древостоев в мезогигрофильных сложных суборях (ТЛУ- С3)

В абсолютных единицах в ультрагигрофильных борах в возрасте древостоя 100 лет на фракцию стволов приходится 128 т на 1 га, на фракцию коры столов – 16 т на 1 га, на фракцию корней – 48 т на 1 га, на фракцию ветвей – 60 т на 1 га и на фракцию хвои – 38 т на 1 га. В мезогигрофильных сложных суборях наблюдается следующее соотношение: фракция стволов – 336 т на 1 га, фракция коры стволов – 32 т на 1 га, фракция корней – 101 т на 1 га, фракция ветвей – 120 т на 1 га, фракция хвои – 58 т на 1 га.

Заключение. Таким образом, в результате статистического моделирования выявлены закономерности фракционной структуры и изменения с возрастом чистой первичной продукции сосновых древостоев. Изложенные методические положения получения регрессионных моделей и лесотипологических кривых роста позволяют глубже оценить и дополнить существующие представления о продукционном процессе лесных экосистем.

Библиографический список

1. Курбанов, Э.А. К вопросу об углерододепонирующих насаждениях / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьёв, Л.С. Мошкина, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев // Вестник МарГТУ – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – 2008. – №3. – С. 5-17.
2. Курбанов, Э.А. Моделирование бюджета углерода лесных насаждений на примере сосняков Поволжья / Э.А. Курбанов // Лесной журнал. – 2009. – № 2. – С. 7-15.
3. Курбанов, Э.А. Пространственная динамика фитомассы березняков на бывших сельскохозяйственных землях Марийского Заволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьёв, Л.С. Устюгова, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев // Лесной журнал. – Архангельск: Архангельский государственный технический университет. – 2010. – №3. – С. 8-14.
4. Усольцев, В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010.
5. Уткин, А.И. Зависимые от фитомассы предикторы надземной чистой первичной продукции насаждений основных лесообразующих пород России / А.И. Уткин, Д.Г. Замолодчиков, Т.А. Гульбе, Я.И. Гульбе, О.В. Милова // Сиб. экол. журн. – 2005. – Т. 12. – № 4. – С. 707-715.
6. Хлюстов, В.К. Возрастная динамика роста и продуктивности сосновых древостоев на лесотипологической основе в условиях боров Костромской области / В.К. Хлюстов, А.В. Лебедев // Наука и Мир. – 2013. – №1 (1). – С. 132-134.
7. Хлюстов, В.К. Возрастная динамика биологической продуктивности сосновых древостоев по типам леса Костромской области. Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международной конференции (14-15 окт. 2015 г.) / В.К. Хлюстов, А.В. Лебедев, О.Е. Ефимов // Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015а. – С. 77-84.
8. Хлюстов, В.К. Динамика биологической продуктивности сосновых древостоев по типам леса Костромской области / В.К. Хлюстов, А.В. Лебедев, О.Е. Ефимов // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы VII международной научно-практической конференции: науч.-исслед. ц. «Академический» North Charleston, SC, USA, 2015б. – С. 1-10.
9. Хлюстов, В.К. Экобиоэнергетический потенциал сосняков Костромской области: монография / В.К. Хлюстов, А.В. Лебедев, О.Е. Ефимов // М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. - 292 с.
10. Linder, S. The seasonal variation in stem and coarse root respiration of 20-year-old Scots pine (Pinus sylvestris L.). / S. Linder, E. Troeng // Mitt. Forstl. Bundes-Versuchsanst, Wien. – 1981. – №142. – P. 125-139.
11. Ryan, M.G. A simple method for estimating gross carbon budgets for vegetation in forest ecosystems / M.G. Ryan // Tree Physiol. – 1991. – №9. – P. 255-266.
12. Ryan, M.G. Foliar maintenance respiration of subalpine and boreal trees and shrubs in relation to nitrogen content / M.G. Ryan // Plant Cell Environ. –1995. – №18. – P. 765-772.
13. Waring, R.H. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? / R.H. Waring, J.J. Landsberg, M. Williams // Tree Physiol. – 1998. – №18(2). – P. 129-134.

УДК 528.721.28

ИЗМЕНЕНИЯ ПРЕДГОРНЫХ ЛЕСОВ БАССЕЙНА Р. ЩУГОР ПО МАТЕРИАЛАМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ ПЕРИОДА 1986-2016 ГГ.

В.В. Елсаков, В.М. Щанов, В.С. Бирюкова, Е.Е. Кулюгина, Ю.А. Дубровский
Институт биологии Коми НЦ УрО РАН

Исследовано современное состояние природных экосистем верховий бассейна р. Щугор (Национальный парк «Югыд ва») на площади порядка 150 тыс. га. В ходе аэровизуальных и полевых маршрутных наблюдений (хр. Кузь-Кудинер в 2016 г.), анализа материалов спутни-

ковой спектрозональной съемки проведена комплексная ресурсная оценка территории с выделением доминирующих классов растительного покрова. Сочетание материалов полевых исследований и разногодовых спутниковых съемок высокого разрешения Landsat и Sentinel 2b позволило провести геоботаническое картирование территории (М 1:100 000), выполнить анализ межгодовых изменений фитоценозов. В пределах исследованного участка лесные фитоценозы представлены темнохвойными (45.0%), светлохвойными (4.4%), лиственными (18.5%) и смешанными (8.2%) сообществами. Меньшую площадь занимают горно-тундровые (21.4%) и болотные (3.8) комплексы. Основные площади бассейна сохраняют свои природные особенности. Достоверность выявления изменений лесных фитоценозов возрастает при использовании зимних изображений. Значимые изменения (слабые положительные тренды увеличения сомкнутости древесного и кустарникового яруса) затрагивают участки склоновых лесных сообществ, экотонов лес-тундра, где отмечены изменения на площади 21.9%. На площади 86.7 га выявлена гарь (дата пожара 11.8-17.8.2015 г.) с последующим зарастанием и началом лесовозобновления.

Ключевые слова: *спектральные характеристики, спутниковые снимки, леса верховьев бассейна р. Щугор, климатогенные изменения*

THE MONITORING OF SHCHUGOR RIVER BASIN FORESTS CHANGES OF 1986-2016 YEARS TIME PERIOD WITH SATELLITE DATA

V.V. Elsakov, V.M. Shchanov, V.S. Birjukova, E.E. Kulyugina, Yu.A. Dubrovskiy
Institute of biology KomiSC UrD RAS

We investigated the current natural ecosystems state of territory upper reaches of the Shchugor river basin on an area about 150 thousand ha. Integrated resource assessment of the territory with allocation of dominant vegetation classes is investigated during the aerovisual and field observations along the route (mountain ridge Kuz-Kudiner in 2016 year), and the analysis of "false-color" satellite images of period 1986-2016 years. The combination of materials of field studies and satellite images of different years high-resolution Landsat and Sentinel 2b images were the main source for geobotanical mapping of the territory (1: 100,000) and analysis of interannual changes of plant communities. Within the investigated area forest plant communities are represented by the dark coniferous (45.0%) and light coniferous (4.4%), deciduous (18.5%) and mixed (8.2%) forest communities. The mountain tundra (21.4%) and wetland complexes (3.8) occupy thesmaller area. The main area of the basin stores their natural features. The reliability of changes detection in forest communities increases with the use of winter images. Significant changes (weak positive trends of increasing of canopy density of tree and shrub layer) affects areas of slope forest communities, ecotones forest-tundra, where the changes are detected in the area of 21.9%. In the area of 86.7 ha burnt place was identified (date of the fire 11.8-17.8.2015) with subsequent overgrowth and reforestation.

Keywords: *spectral characteristics, satellite images, forest ecosystems dynamics, basin of the Shchugor river, Ural, climatogenic changes*

Анализ изменений предгорных и горных лесов в связи с более яркой выраженностью градиента эколого-ценотических условий, приводящей к зональным сменам растительности на более компактной по площади территории, чем на равнинной части, приковывает внимание многих исследователей (Шиятов, и др., 2005; Шиятов, 2009; Елсаков, Марущак, 2011; Кравцова, Лошкарева, 2013; Им, Харук, 2013 и др.). Основные тенденции изменения лесных фитоценозов на верхней границе леса предгорных и горных участков прослеживаются в продвижении границы леса и увеличении сомкнутости крон залесенных участков, усилении радиального прироста древесины (Ойдупа и др., 2004), что связывается с климатическими сдвигами. Среди основных методов исследований привлекаются возможности анализа исторических ландшафтных фотографий, материалов разновременных спутниковых съемок (Курбанов и др., 2014). В качестве наиболее важного показателя, используемого для выявле-

ния временных изменений лесных фитоценозов, используется характеристика сомкнутости древостоев. Предварительный анализ данных показал, что достоверность выявления показателей сомкнутости возрастает при использовании зимних изображений, что, с одной стороны, связано с маскированием многих форм микрорельефа земной поверхности снежным покровом (Алексеенко, 2008), с другой – с отсутствием листвы и погребением лишайниково-мохового, травяно-кустарничкового и частично кустарникового яруса, что приводит к большей контрастности исследуемых компонент. Использование материалов спектрозональной зимней спутниковой съемки Landsat позволило наблюдать климатогенные изменения, вызванные флуктуациями погодных условий, территории Приполярного Урала (Марущак, Елсаков, 2010).

Цель настоящей работы состояла в выявлении особенностей распределения доминирующих классов земной поверхности с лесной растительностью и выявления изменений этих природных экосистем в верховьях бассейна р. Щугор (общая площадь 1,6 тыс. км^2) за период 1986-2016 гг.

Объект и методика исследований.

Верхнее течение р. Щугор (от истока до впадения правого притока р. Торговая) имеет протяженность около 120 км и занимает крайнее юго-восточное положение в Национальном парке «Югыд Ва». Долина реки на данном участке располагается в вытянутой с юга на север межгорной депрессии и окаймлена с запада массивом г. Тельпосиз и хребтами Туйтымнёр, Кузь-Кудинёр и Ууты, с востока хребтами главного водораздела Урала Яны-Янкеч, Хосанёр, Састемнёр и Сумъяхнёр. На юге верховья Щугора ограничены хребтами Тондер и Саранъиз. Общая площадь бассейна верхнего течения Щугора составляет около 150 тыс. га. Гора Тельпосиз имеет высоту 1619 м над уровнем моря и является наивысшей точкой Северного Урала. Весь массив этой горы разительно отличается от других вершин Северного Урала ярко выраженными формами альпийского (горно-ледникового) рельефа: крутостенными карами и цирками, днища которых заполнены озерами, снежниками и ледничками. Здесь расположены самые южные на Урале ледники: Говорухина и Южный. Первый из них расположен в каре восточного склона г. Тельпосиз, второй на восточном склоне вершины 1180.3 м в истоке р. Хальмерья (левый приток Щугора). Хребты главного водораздела Урала вытянуты узкой полосой в меридианальном направлении и имеют закругленные и уплощенные вершины с абсолютными отметками 700-900 м над у.м.

Для выполнения тематического картографирования и анализа изменений были использованы материалы спутниковой съемки высокого разрешения Landsat и Sentinel 2b летнего и зимнего периодов 1986-2016 гг. (табл. 1). Анализ временных изменений сомкнутости полога древесного яруса по данным съемки ранневесенних (март-апрель) был выполнен по семи изображениям Landsat TM 4 и 5, ETM+, OLI.

Таблица 1

Характеристика использованных в работе материалов спутниковых съемок

Path-row:	Даты съемки	Спутник, сенсор
Ранняя весна: 168-15/16	1986-03-26	Landsat 5 TM
	1990-04-22	Landsat 5 TM
	2000-04-09	Landsat 7 ETM+
	2016-03-28	Landsat 8 OLI
167-15/16	2013-04-14	Landsat 8 OLI
	2015-04-04	Landsat 8 OLI
	2016-03-05	Landsat 8 OLI
Лето : 168-15/16	1986-06-14	Landsat 5 TM
	1987-08-20	Landsat 5 TM
167-15/16	2011-07-14	Landsat 5 TM
	2013-07-03	Landsat 8 OLI
	2016-07-02	Landsat 8 OLI
-	2016-07-23	Sentinel 2b

Выполнение пошаговой управляемой классификации спутниковых летних безоблачных изображений (сцена от 2013 г.) позволило провести тематическое картографирование доминирующих классов земной поверхности с оценкой корректности их выделения по материалам полевых обследований (в 2016 г. сотрудниками Института биологии обследован участок в окрестностях хр. Кузь-Кудинер). Наибольший вклад в сложение растительного покрова территории имеют сообщества темнохвойных лесов (45.0% площади), горных тундр (21.4%), лиственных лесов и редколесий (18.5%). Менее значительная площадь приходится на долю классов болотных комплексов (3.8%), представленных преимущественно в предгорной долинной части, светлохвойных лесов (группа горных разреженных лиственничников) (4.4%) и горных лугов (1.2%).

Для выявления долговременных межгодовых изменений структуры лесных насаждений использовали принципы декомпозиции спектральных смесей (метод SMA, *Spectral Mixed Analysis*), опробованные ранее (Елсаков, Марущак, 2011). В качестве «чистых компонент» использовали параметры минимальных и максимальных показателей сомкнутости, полученные для открытых пологих заснеженных участков (сомкнутость крон равна 0) и участков с максимально-сомкнутым древостоем (сомкнутостью крон 0.9-0.95). Общий принцип оценки доли отдельных компонент для линейного смешивания спектров проводили согласно уравнению:

$$DN_c = \sum_{i=1}^{n} F_i * DN_{i,c} + E_c \quad , \tag{1}$$

учитывая следующие ограничения:

$$\sum_{i=1}^{n} F_i = 1 \;\; 0 \le F_i \le 1, \tag{2}$$

где DN_c – числовое выражение значения пиксела в канале *c*, F_i – доля *i*-го эталона в смеси, DN_{ic} – числовое выражение значений *i*-го эталона в смеси в канале *c*, *n* – количество эталонов, E_c – ошибка оценки для канала *c*. Полученные изображения корректировали с использованием ранее установленной зависимости (Елсаков, Марущак, 2011) вида:

$$y = 0.58x + 18.1 \; . \tag{3}$$

Данное отношение разработано с использованием материалов полевых координатно-привязанных измерений (камера Canon EOS-60D с объективом «Fish-Eye». Сходимость величин полевых и спутниковых измерений при этом обнаруживает высокую степень значимой корреляции (r^2=0.88, n = 35). Абсолютное доминирование в формировании значений «древесной» компоненты на модельных участках относится к ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и лиственнице сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), в качестве примеси отмечены береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.), ольховник кустарниковый (*Duschekia fruticosa* (Rupr.)), древовидные виды ив (*Salix sp.*). Расчет значений компоненты «сомкнутости древостоев» для пикселов изображения по крайним элементам значений (0-100%) выполнено с использованием возможностей программного пакета ENVI 4.6.1. Итогом обработки изображений 1986-2016 гг. стали тематические картосхемы, отражающие изменения показателя сомкнутости древесного яруса (%) для отдельных лет наблюдений (рис. 1А). Результаты обработки легли в основу расчета интенсивности изменения показателя по 7 изображениям (1986 -2016 гг.), представленного в виде линейной функции (рис. 1Б).

Часто в пределах равнинной части лесных сообществ Национального парка «Югыд Ва» для большинства старовозрастных лесов прослеживаются устойчивые тренды понижения индекса NDVI, с интенсивностью до 0.02-0.03 за 10 лет, что в целом характерно для старовозрастных лесов, для которых по мере увеличения возраста степень просматриваемости «в глубину» на аэрофотоизображениях возрастает. Для большинства таких участков характерно

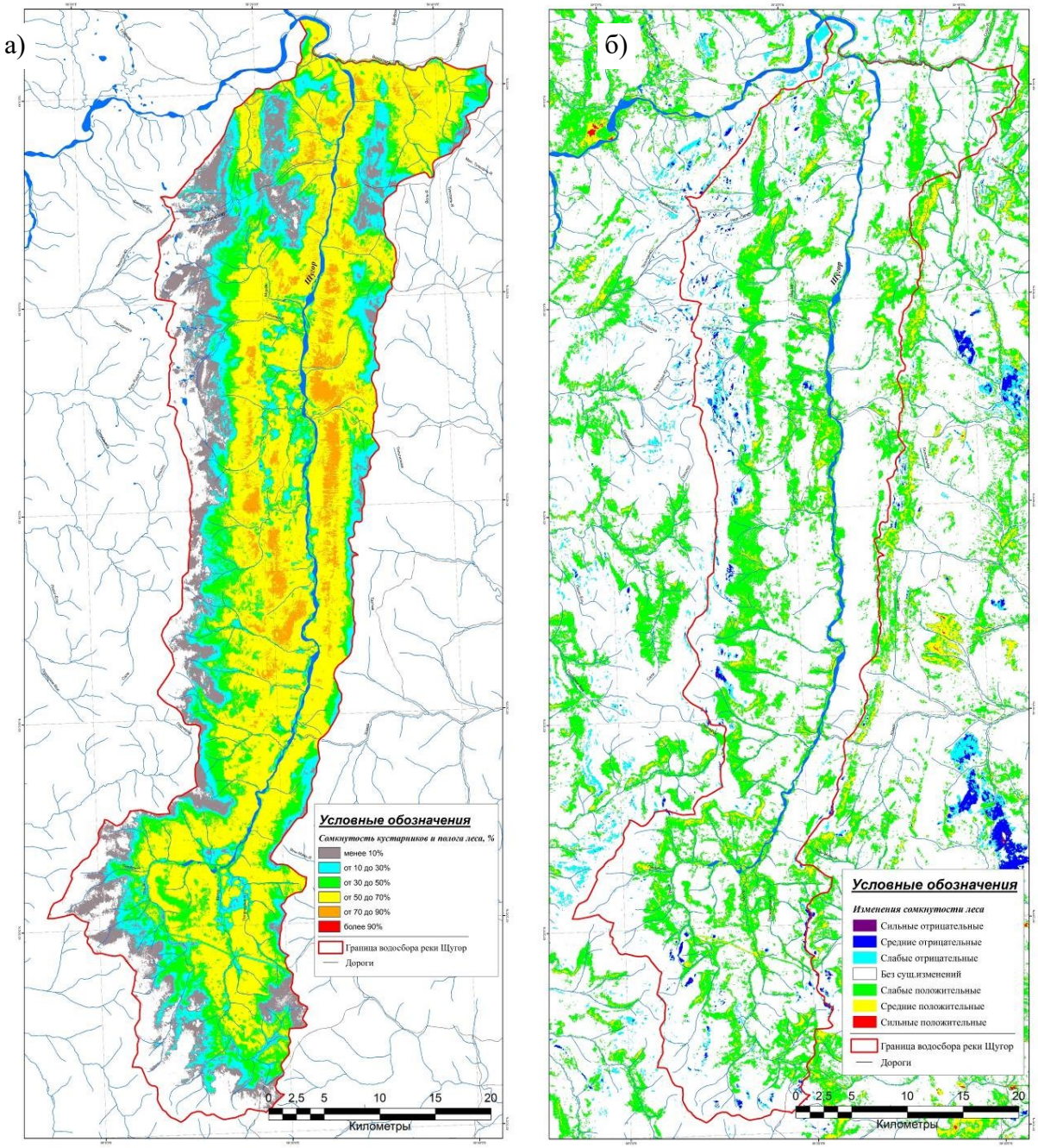


Рис. 1. Распределение показателя сомкнутости крон по зимнему изображению Landsat (%) (А); изменения сомкнутости древесного полога бассейна верховий р. Щугор по ранневесенним изображениям периода 1986-2016 гг. (Б)

стабильное состояние или слабое снижение сомкнутости крон древостоя. На территории верховий бассейна р. Щугор существенные изменения показателя отмечены на участке пожара 2005 г. (ориентировочно произошедшего 11-17 августа), имеющего площадь 86.7 га. Наличие последствий пожара прослеживается как по летним, так и по зимним изображениям, что проявляется в виде усыхания и гибели древостоя.

Наиболее высокие показатели сомкнутости полога отмечены на юго-западных склонах в классах земной поверхности с березовыми лесами (табл. 2). Увеличение показателя в градации средних положительных изменений (от 1% до 2% за год) отмечено на площади до 18.2%, в ивняках травяных до 16.3%. В меньшей степени увеличение сомкнутости древостоя зарегистрировано в отношении классов горных разреженных лиственничников (7.5%). Прослеживается рост показателя сомкнутости и на участках экотонов с еловыми и березовыми редко-

лесиями, оконтуривающих выходы горных пород, шириной от 200 до 1000 м, в среднем до 300 м.

Таблица 2

Площади классов с различными трендами изменений сомкнутости (в % от всей площади)

Фитоценоз	Классы изменений*							От общей площади
	1	2	3**	4	5	6	Итого	
Ивняки травяные		0,2	0,7	32,2	50,5	16,3	100.0	4,2
Горные разреженные лиственничники		1,5	2,2	50,7	38,1	7,5	100.0	4,4
Березово-лиственничные леса			0,1	16,6	65,0	18,2	100.0	10,3
Березово-еловые леса			0,1	60,7	35,7	3,5	100.0	8,2
Ельники-зеленомошные			0,2	73,6	24,2	2,1	100.0	12,4
Ельники долгомошные			0,4	96,2	3,1	0,3	100.0	29,4
Заболоченные леса (сфагновые)		0,2	0,4	41,0	50,4	8,0	100.0	3,2

* классы изменений: 1 - сильные отрицательные (снижение сомкнутости 2% за год); 2 - средние отрицательные (от 2% до 1% за год); 3 - слабые отрицательные (от 1% до -0,5% за год); 4 - без изменений (от 0,5% до увеличения сомкнутости на 0,5% за год); 5 - слабые положительные (от 0,5% до 1% за год); 6 - средние положительные (от 1% до 2% за год); 7 - сильные положительные (более 2% за год).

** - выделена область слабых изменений и входящих в состав погрешностей.

Существенных изменений значений NDVI на летних сериях снимков на участках не отмечено. На пройденных пожаром участках увеличение индекса NDVI отмечено на следующий год после нарушения растительного покрова за счет восстановления травяно-кустарничкового и кустарникового ярусов. Повышение показателя сомкнутости крон древостоя на таких участках фиксируется через 10-15 лет.

Заключение. Таким образом, анализ материалов спектрозональной спутниковой съемки, выполненный на территорию верховий бассейна р. Щугор, позволил выявить особенности распределения доминирующих растительных сообществ, рассчитать соотношение доминирующих классов растительности, подготовить макет тематической геоботанической карты. На равнинной части бассейнов рек преобладают темнохвойные (еловые) леса. В долинах горных участков, доминируют редколесья (лиственничные и еловые) переходящие в ерниковые и кустарничковые тундры. В поймах ручьев, ложбинах стока сформированы ивняки (преимущественно разнотравные и моховые).

Анализ разновременных изображений периода 1986-2016 гг. показал, что значительная часть территории сохраняет свои природные особенности. Среди наиболее представленных изменений в пределах территории отмечены: рост сомкнутости ранее разреженных лесных сообществ, «подъем» лиственных березовых фитоценозов по склоновым участкам, приводящее к смещению границ экотона лес-тундра.

Работа подготовлена в рамках выполнения г/б темы отдела «Структурно-функциональная организация растительных сообществ, разнообразие флоры, лихено-и микобиоты южной части Национального парка «Югыд ва» (АААА-А16-116021010241-9) и проекта Президиума УрО РАН «Живая природа» Разнообразие растительного мира и почвенного покрова ландшафтов, перспективных для включения в состав объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО «Девственные леса Коми» (проект № 15-12-4-1).

Библиографический список

1. Алексеенко, Н.А. Зимние топографические карты / Н.А. Алексеенко, Т.Г. Сваткова // Вестн. Моск. ун-та. – Сер. 5. География, 2008. – №3. – С. 8-11.

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

3. Им, С.Т. Климатически индуцированные изменения в экотоне альпийской лесотундры Плато Путорана / С.Т. Им, В.И. Харук // Исследование Земли из космоса. – 2013. – №5. – С. 32-44.

4. Кравцова, В.И. Динамика растительности экотона тундра-тайга на Кольском полуострове в связи с климатическими колебаниями / В.И. Кравцова, А.Р. Лошкарева // Экология. – 2013. – № 4. – С. 275-283
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. Марущак, И.О. Материалы спутникового мониторинга в анализе сомкнутости фитоценозов Приполярного Урала / И.О. Марущак, В.В. Елсаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Вып. 7(1). – С. 310-318.
7. Ойдупаа, О.Ч. Длительные изменения летней температуры и радиальный рост лиственницы на верхней границе леса в Алтае-Саянской горной стране / О.Ч. Ойдупаа, Е.А. Ваганов, М.М. Наурзбаев // Лесоведение. – 2004. – №6. – С. 14-24.
8. Шиятов, С.Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 216 с.
9. Шиятов, С.Г. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале / С.Г. Шиятов, М.М. Терентьев, В.В. Фомин // Экология. – 2005. – №2. – С. 83-90.

УДК 528.88

ПРОЦЕССЫ ЛЕСОВОЗОБНОВЛЕНИЯ НА ЗАЛЕЖАХ ЮГО-ЗАПАДА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Э.А. Терехин
Белгородский государственный национальный исследовательский университет

В статье изложены результаты оценки процессов лесовозобновления на залежных землях юго-запада Среднерусской возвышенности с применением рядов разновременных спутниковых данных и материалов полевых обследований. Зарастание залежей древесной растительностью приводит к смене их спектрально-отражательных свойств. Она обусловлена формированием новых растительных сообществ. Оценка зарастания была выполнена с применением многозональных снимков Landsat и информационных продуктов, создаваемых на основе регулярно получаемых снимков MODIS. Исследованы межгодовые различия в динамике спектрально-отражательных свойств, обусловленные процессами зарастания. Установлено, что для многих залежных земель характерно зарастание хвойными лесными насаждениями. При этом хвойные леса не доминируют на территории региона. На зарастающих залежах наблюдаются процессы как естественного, так и искусственного лесовозобновления. Зарастание лесной растительностью обуславливает рост максимальных годовых значений вегетационного индекса NDVI, который связан с объемом зеленой растительной массы и ее проективным покрытием. При зарастании залежей хвойными лесными насаждениями происходит рост и минимальных внутригодовых величин индекса. Рост минимальных годовых значений обусловлен тем, что хвоя не опадает в зимний период. Анализ значений NDVI показал, что его достоверные межгодовые различия начинают наблюдаться в среднем на 8-й год после начала процесса зарастания. Таким образом, за этот период времени основная часть залежи зарастает древесной растительностью. Для искусственного типа лесовозобновления преимущественно характерна более высокая скорость, чем для естественного. Она отражается на повышенной интенсивности увеличения среднегодовых значений вегетационного индекса.

Ключевые слова: *залежи, лесовозобновление, данные дистанционного зондирования, Landsat, MODIS.*

REFORESTATION ON ABANDONED LANDS SOUTHWEST OF CENTRAL RUSSIAN UPLAND

E.A. Terekhin
Belgorod State National Research University

The paper discussed the results of assessment of reforestation processes on abandoned agricultural lands southwest of Central Russian Upland using multi-temporal remote sensing data and

field survey materials. Overgrowing abandoned farmland by forest vegetation causes to a change in their spectral reflectance properties. It is caused by the formation of new vegetation communities. Estimation of overgrowing agricultural lands was performed with using of multispectral images Landsat and MODIS imagery. The interannual differences in the dynamics of spectral reflectance properties caused by the processes of overgrowing were investigated. It has been established that many abandoned agricultural lands are overgrown with coniferous forest. Meanwhile coniferous forests not dominate in the region. On overgrown abandoned lands observed the processes of natural and artificial reforestation. Overgrowing by forest vegetation causes the growth of the maximum annual NDVI vegetation index values, which is linked with the volume of green plant mass and its projective cover. Overgrowing abandoned lands by pine forest leads to growth minimal interannual vegetation index values. Growth of minimal index values caused to the fact that the needles do not fall off in winter. Analysis of NDVI values showed that his significant interannual differences begin to be observed in the 8 th year after the beginning of overgrowing. That is, during this period the main part of abandoned land is overgrown with forest vegetation. Artificial reforestation is characterized by a higher rate than natural. It is noticeable in the more intensive growth of the average annual vegetation index values.

***Keywords**: abandoned lands, reforestation, remote sensing data, Landsat, MODIS.*

Введение. Изучение сукцессионных процессов на залежных землях позволяет оценить тенденции в динамике растительного покрова, в частности интенсивность процессов лесовозобновления. В агроландшафтах залежи выполняют ряд функций, восстанавливая почвенный покров и нормализуя водный режим (Голеусов, 2009; Парахневич, 2012). На территории юго-запада Среднерусской возвышенности, расположенной преимущественно в зоне лесостепи, совокупность природных факторов обуславливает различные варианты восстановления растительных сообществ на залежных землях. На их месте могут формироваться фитоценозы, состоящие как из травянистой, так и древесной растительности. Вследствие аграрного освоения, начиная с XVII в., лесистость территории юго-запада Среднерусской возвышенности значительно сократилась, но в последние десятилетия на многих угодьях, выведенных из севооборота, наблюдаются процессы как естественного, так и искусственного лесовозобновления.

В процессе зарастания залежей происходит формирование нового типа растительного сообщества, что приводит к изменениям в спектрально-отражательных свойствах бывших аграрных угодий. Исследование происходящих изменений может быть проведено с применением материалов многозональных спутниковых съемок (Alcantara, 2012), которые в настоящее время все шире применяются для изучения динамики растительного покрова. Для оценки зарастания залежных земель применяются снимки серии Landsat, позволяющие достаточно эффективно оценивать межгодовую динамику спектральных показателей (Курбанов, 2011; Prishchepov, 2012; Лежнин, 2015). В связи с тем, что скорость зарастания залежей может отражаться не только на межгодовых, но и на сезонных особенностях динамики спектрально-отражательных признаков, интерес представляет их анализ на основе данных спутниковой съемки высокого временного разрешения.

Цель исследования заключалась в оценке процессов лесовозобновления на залежах юго-запада Среднерусской возвышенности на основе совместного использования серий спутниковых данных Landsat, данных высокого временного разрешения MODIS и материалов полевых исследований. Задачами исследования являлись оценка скорости зарастания залежей древесной растительностью, изучение динамики спектрально-отражательных свойств, вследствие изменений в растительном покрове. Объектом исследования выступали залежные земли, на которых наблюдались процессы лесовозобновления.

Материалы и методы исследования. В основу исследования был положен анализ разновременных снимков различного пространственного разрешения и материалы полевых об-

следований, проведенных в период 2008-2015 гг. Для анализа особенностей зарастания залежных земель были использованы разновременные снимки серии Landsat TM, ETM+, OLI (USGS). Многолетняя динамика спектрально-отражательных свойств залежей была изучена на основе информационных продуктов MOD13Q1 (Vegetation Indices) путем анализа значений вегетационного индекса NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс). Снимки MODIS, на основе которых создаются изображения MOD13Q1, в отличие от данных Landsat TM, OLI, характеризуются более низким пространственным разрешением (250 м/пиксель), что существенно ограничивает их применение для анализа спектрально-отражательных характеристик небольших по площади объектов. В то же время высокая частота их получения дает возможность более детально проанализировать как межгодовые, так и сезонные особенности динамики вегетационного индекса NDVI.

На анализируемой территории было проанализировано около 100 залежей, расположенных в различных частях региона. Но выборка для статистического анализа была по объему немного меньше в связи с тем, что небольшие размеры многих залежных земель не позволили провести достоверный расчет их спектрально-отражательных характеристик, обусловленный ограничениями, связанными с пространственным разрешением снимков MODIS (250 м). Для каждой залежи методом зональной статистики был рассчитан и проанализирован многолетний ряд значений NDVI за период 2006-2015 гг. с интервалом в 16 дней. Кроме того, была проведена статистическая оценка межгодовых различий в значениях вегетационного индекса, оценены особенности его динамики для залежей, на которых наблюдается естественное и искусственное лесовозобновление.

Результаты. Анализ разновременных космических снимков и полевых данных показал, что на территории региона одним из типов зарастания залежей лесом является формирование на их месте сосновых лесных насаждений. Этот тип зарастания распространен на территориях с повышенной долей хвойных лесных массивов. По сравнению с зарастанием лиственными породами, он является более выраженным. При этом хвойные (сосновые) леса на территории региона по площади значительно уступают лиственным насаждениям (преимущественно дубравам), составляя примерно 10% от общей площади лесов. Зарастание сосной обусловлено тем, что эта лесная порода неплохо приживается на малоплодородных почвах, во многом характерных для залежей региона, и часто используется в искусственном лесовозобновлении. Для процесса зарастания хвойными породами характерна достаточно высокая скорость, позволяющая наблюдать динамику формирования лесных сообществ на снимках Landsat, полученных с интервалом 1-2 года (рис. 1).

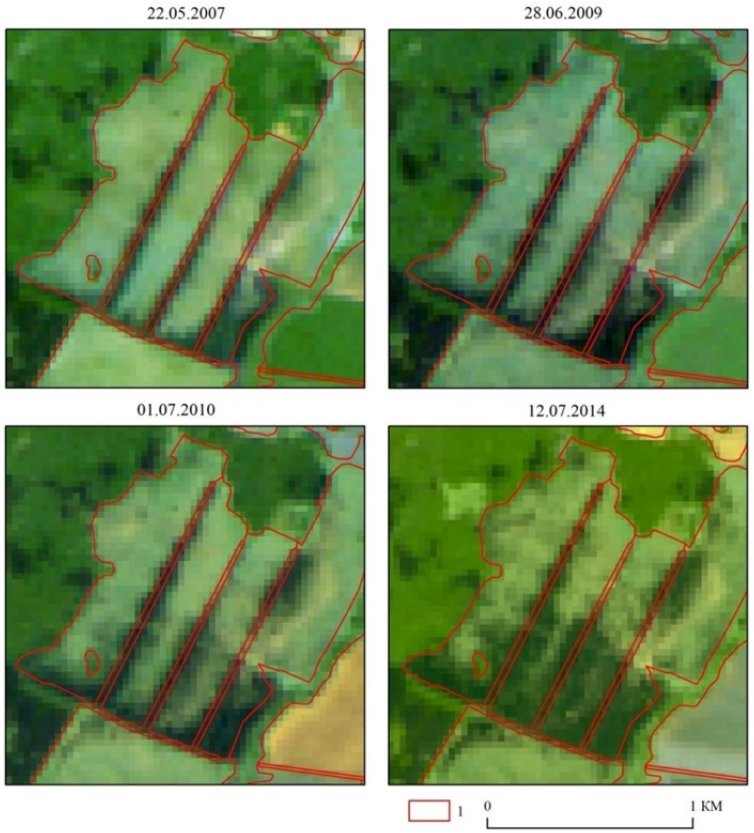


Рис.1. Процесс зарастания залежей древесной растительностью на снимках Landsat TM, OLI: 1 – контуры анализируемых земель

На рисунке 1 видно, что процесс зарастания распространяется из участков, граничащих с сосновыми лесопосадками, к центральным частям залежных земель. На основе анализа многолетних рядов вегетационного индекса, рассчитанных на основе информационных продуктов MOD13Q1, удалось выявить ряд особенностей его динамики, обусловленных формированием лесных сообществ на месте бывших аграрных угодий. После начала процесса зарастания залежи древесной растительностью с определенного времени начинается рост максимальных и среднегодовых значений NDVI. В случае если на месте залежи формируется хвойное насаждение (наиболее распространенный тип зарастания лесом), происходит рост и минимальных внутригодовых значений, обусловленный тем, что хвоя не опадает в зимний период. Вследствие этого амплитуда колебаний вегетационного индекса постепенно сдвигается в область более высоких значений (рис. 2). По мере увеличения сомкнутости насаждений изменения в динамике индекса проявляются более существенно. График на рисунке 2 характеризует динамику вегетационного индекса залежей, показанных на рисунке 1, и позволяет наглядно проанализировать степень изменения индекса, вследствие появления на залежи нового типа растительности.

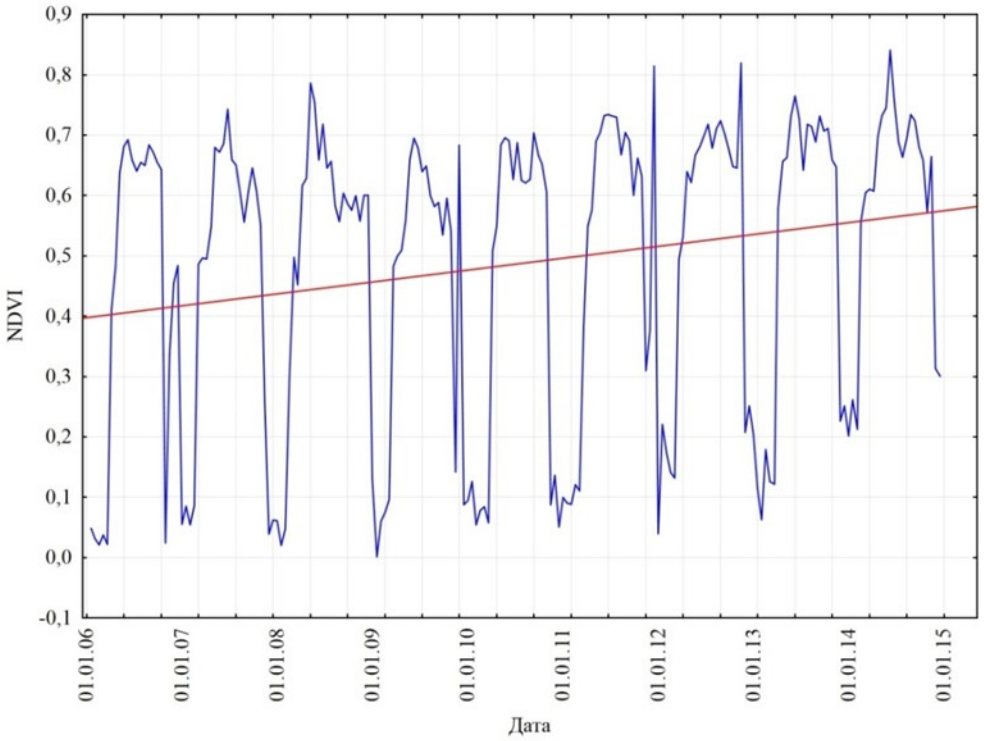


Рис.2. Многолетняя динамика NDVI залежи после начала на ней процесса лесовозобновления (в 2005 г.)

Из графика на рисунке 2 видно, что с 2013 г. начался интенсивный рост минимальных внутригодовых значений вегетационного индекса (зимний период), обусловленный формированием на значительных участках залежей сомкнутых хвойных насаждений, что наглядно видно на разновременных снимках Landsat.

Статистический анализ зимних значений вегетационного индекса (первая половина января) показал, что достоверные отличия наблюдаются на 8-й год после начала процесса зарастания. Т.е. к этому времени на территории залежи или на основной ее площади формируется сомкнутое хвойное насаждение, январские значения NDVI которого становятся достоверно отличными от значений индекса предыдущих лет. Иными словами период в 8 лет можно рассматривать как время, примерно необходимое для практически полного зарастания залежи или основной ее части сосновым насаждением.

Тренд увеличения среднегодовых значений вегетационного индекса характерен для подавляющего большинства анализируемых объектов. В большей степени он проявляется в случае, когда к конечной (в настоящем исследовании) анализируемой дате значительная часть залежи покрыта сомкнутым лесным насаждением.

Исходя из того, что на территории исследования были представлены залежи, для которых характерен как естественный, так и искусственный тип лесовозобновления, нами был проведен анализ степени различия их спектрально-отражательных свойств. Т.е. была проведена оценка влияния типа лесовозобновления (естественное или искусственное) на значения вегетационного индекса. Различия в спектральных характеристиках могут быть обусловлены разной скоростью зарастания залежей на участках искусственного и естественного лесовозобновления. Вследствие того, что NDVI связан с объемом зеленой растительной массы и ее проективным покрытием, более высокая степень зарастания должна обусловливать большую интенсивность увеличения значений вегетационного индекса.

Для этой цели нами была проанализирована динамика NDVI отдельно для естественного и искусственного типов лесовозобновления. Одним из периодов, когда влияние фактора происхождения насаждения должно проявляться наиболее существенно, является вторая половина августа, когда трава на участках залежей, не покрытых лесной растительностью, становиться сухой. Оценка значений вегетационного индекса методом дисперсионного анализа показала, что участки искусственного лесовозобновления преимущественно характеризуются большей интенсивностью увеличения значений вегетационного индекса (рис. 3).

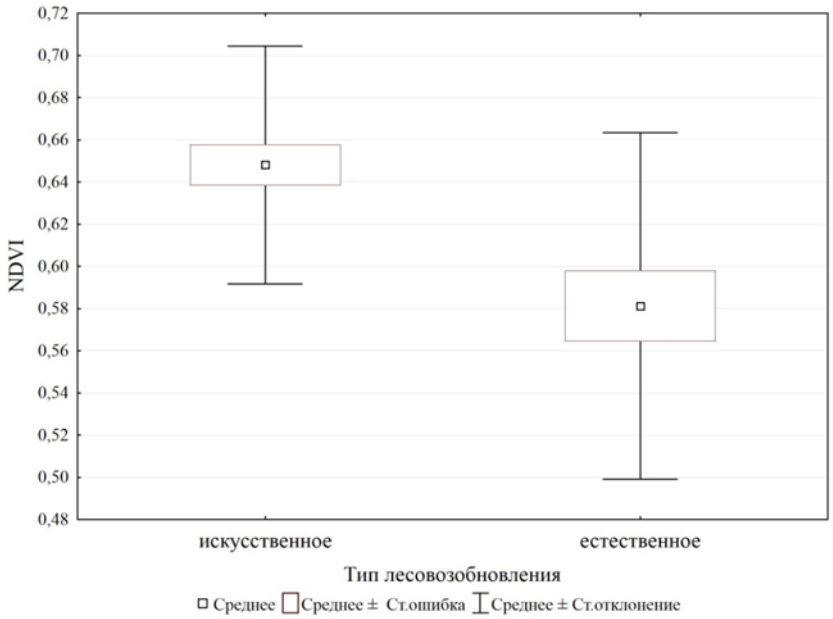


Рис.3. Различия в значениях NDVI конца лета для залежей, отличающихся по типу лесовозобновления, на 7-й год после начала зарастания лесной растительностью

Статистически значимые различия начинают наблюдаться на 6-7-й год после начала процесса лесовозобновления, что обусловлено тем, что к этому времени залежи, на которых происходит искусственное лесовозобновление, имеют более высокие значения NDVI

Отклонения от выявленной закономерности наблюдаются в случаях, если вследствие усыхания насаждений или пожаров, процесс лесовозобновления прерывается, что, в свою очередь, отражается в резком снижении значений вегетационного индекса.

Выводы. Оценка процессов лесовозобновления на залежных землях с применением рядов разновременных спутниковых данных и материалов полевых обследований позволила установить ряд их особенностей, характерных для юго-запада Среднерусской возвышенно-

сти. Зарастание сосновыми насаждениями – один из распространенных типов сукцессии на залежах, расположенных на территориях, характеризующихся наиболее высокой долей сосновых лесных насаждений. При этом хвойные насаждения не являются доминирующими на территории региона. Процесс зарастания залежей хвойными породами протекает в большинстве случаев достаточно быстро, что можно наблюдать на снимках высокого пространственного разрешения и рядах многолетних значений вегетационного индекса NDVI. Статистический анализ его многолетних рядов показал, что формирование на месте залежи или значительной ее площади сомкнутого лесного насаждения в среднем происходит на 8-й год после начала процесса лесовозобновления. Зарастание залежей хвойными насаждениями приводит к повышению максимальных и минимальных годовых значений индекса. Для искусственного типа лесовозобновления в большинстве случаев характерна большая интенсивность, чем для естественного типа, отражающаяся в более высоких значениях индекса на 6-7-й год после начала процесса зарастания залежи древесной растительностью.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-4611.2016.5.

Библиографический список

1. Голеусов, П.В. Воспроизводство почв в антропогенных ландшафтах лесостепи / П.В. Голеусов, Ф.Н. Лисецкий. – М.: ГЕОС, 2009. – 210 с.
2. Курбанов, Э.А. Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье / Э.А. Курбанов, Т.В. Нуреева, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Т.Ф. Мифтахов, С.А. Незамаев, Ю.А. Полевщикова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2011. – № 3. – С. 17-24.
3. Лежнин, С.А. Определение зарастания залежей Марийского Заволжья древесной растительностью по данным ДЗЗ / С.А. Лежнин // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международной конференции. – Йошкар-Ола, Поволжский государственный технологический университет, 2015. – С. 114-118.
4. Парахневич, Т.М. Изменение структуры растительных сообществ в ходе сукцессии на залежи / Т.М. Парахневич, А.И. Кирик // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2012. – №4. – С. 68-73.
5. Alcantara, C. Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data / C. Alcantara, T. Kuemmerle, A. V. Prishchepov, V. C. Radeloff // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 124. – P. 334-347.
6. Prishchepov, A.V. The effect of Landsat ETM/ETM + image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe / A. V. Prishchepov, V. C. Radeloff, M. Dubinin, C. Alcantara // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 126. – P. 195-209.
7. Vegetation Indices 16-Day 250m: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1
8. USGS Global Visualization Viewer: Available at: http://glovis.usgs.gov/

УДК 630*181. 691.11

КРУГОВОРОТ УГЛЕРОДА В УПРАВЛЯЕМЫХ И НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ЛЕСАХ ЕВРОПЫ

М. Браун
Университет природных ресурсов и естественных наук, Вена

Представлены результаты исследований круговорота углерода в лесах, выполненные в Австрии, Швеции и Финляндии. Использована концепция построения углеродного цикла с обратной связью, а именно: углеродный цикл с учетом заготовленной древесины. Применение моделей CALDIS и FOHOW позволило дать прогноз динамики запасов углерода в лесных экосистемах при разных сценариях лесоуправления. В качестве возможных путей перехода к экономике, основанной на минимизации источников CO_2 и сохранении его резервуаров, предложены изменение режима использования заготовленной древесины, развитие рынка экосистемных услуг, внедрение системы торговли углеродными квотами между лесопользователями.

Ключевые слова: *углеродный баланс, изменение климата, потоки углерода, смягчение последствий изменения климата, управление лесными ресурсами*

CARBON CYCLING IN MANAGED AND UNMANAGED FORESTS

M. Braun
University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

In Austria, Sweden and Finland there were extensive investigations made in the past for carbon cycling in forests and the changes over time. When looking at forest carbon cycles there is potential in utilizing another feedback cycle, namely the carbon cycle involving harvested wood products. We present a review of an Austrian project which assessed the development of carbon stocks and flows for the future. We show four important steps for transforming the forest-based sector towards a bioeonomy.

Keywords: *carbon balance, climate change, carbon flows, mitigation of climate change, forest management*

Введение

Земли, покрытые лесной растительностью, занимают более 40% площади Европейского Союза (28 стран-членов и шесть сотрудничающих стран). Более 95% лесов в этом регионе являются управляемыми, поэтому их способность содействовать смягчению последствий изменения климата, а также появлению биоэкономики зависит в значительной степени от стратегий и технологий лесоуправления и лесопользования. В Европе существует многолетняя практика мониторинга лесов – такие организации, как Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН, Международный институт прикладного системного анализа, Европейский лесной институт занимаются моделированием спроса и предложения на европейских и мировых рынках лесной продукции, используя данные об особенностях структуры, динамики и продукционного процесса лесов. Также здесь выполняются программы исследований, предоставляющих информацию о лесах в контексте биоэкономики (например, http:// diabolo-project.eu). Тем не менее, формирование пула продукции лесной промышленности и его движение по производственно-сбытовым цепочкам в значительной степени зависит от решений лесопользователей, а также от социальных лицензий на осуществление деятельности. Эти лицензии выдаются некоммерческими организациями, которые осуществляют природоохранную деятельность, в частности, восстановление природных ресурсов. Парижское соглашение по климату, принятое в декабре 2015 года призывает страны со значительными лесными территориями максимально использовать потенциал экосистем для смягчения последствий изменения климата. Такие меры должны носить региональный характер, что обусловлено спецификой структурной организации лесных растительных сообществ и различными стратегиями лесоуправления.

Вырубка коренных и увеличение доли производных (как правило, деградированных) лесов часто сопровождаются переходом значительного объёма углерода из пула фитомассы в пул атмосферы. В базовом сценарии антропогенное воздействие минимально, леса защищены и являются резервуарами углерода большой ёмкости (Курбанов и др., 2008; Keith et al., 2015). Углеродные потери, возникающие после лесозаготовки, уменьшают энергетический эквивалент заготовленной биомассы и создают неблагоприятные условия для лесовосстановления. Лесоуправление с странах ЕС не одинаково. В результате активного управления возможно одновременное увеличение и запасов лесных насаждений, и объёмов лесопользования.

Роль лесов и лесного хозяйства в смягчении последствий изменения климата все чаще обсуждается не только в научной литературе, но и в политических программах. Впервые идея

использования управления лесными ресурсами для смягчения последствий изменения климата была сформулирована в 1970-х годах. Два десятилетия спустя Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) дала этому научное обоснование (Braun et al, 2016). Увеличение запасов углерода в живой биомассе, почве и подстилке возможно через замещение продуктов, производимых с использованием ископаемых источников энергии на лесную продукцию (Курбанов, 2002). Последнее приводит к постоянным климатическим преимуществам, в то время как хранение углерода в живой биомассе в лесах носит временный характер (Lundmark et al., 2014). Чтобы понять комплексность управления лесными ресурсами и углеродного баланса в лесных экосистемах, необходимо одновременно оценивать запасы углерода в лесах и в предметах потребления в обществе, а также объем замещения ископаемых видов топлива на лесную продукцию (Kilpeläinen et al., 2016; Lundmark et al., 2014; Torssonen et al., 2015). Однако такая концепция управления лесными ресурсами поразному воспринимается в разных странах, применяются различные временные и пограничные модели, в частности (Lundmark et al, 2014; Holtsmark, 2012), есть противоречивые мнения о том, как наилучшим образом использовать леса для смягчения последствий изменения климата. Принимая во внимание Парижское соглашение по климату (2015), в котором говорится о роли лесов и лесного хозяйства в смягчении последствий изменения климата, приходится констатировать необходимость всестороннего обсуждения состояния дел на научной основе с заинтересованными сторонами и выработки единой концепции совместных действий.

Цель, задачи и гипотезы

На конференции по климату в Париже (COP21) в декабре 2015 года 195 стран-участниц приняли первое юридически обязательное соглашение по поддержанию средней температуры на поверхности планеты на уровне ниже 2 °C, которое вступит в силу в 2020 году. Парижское соглашение глобально, тогда как его внедрение требует принятия решений на уровне национальной и региональной политики. В Европе, как и в любом другом регионе, такие решения обязательно будут касаться лесного хозяйства и управления лесами, при этом большое внимание будет уделяться использованию лесной продукции. Эти региональные предложения должны быть основаны на глубоких научных знаниях, объединенных со знаниями заинтересованных сторон лесного сектора.

Настоящее исследование оценивает количественные и качественные социально-экологические характеристики производственно-сбытовых цепочек лесной продукции в сравнении с производственно-сбытовыми цепочками ископаемых материалов. Полученные результаты будут предоставлены лицам, принимающим решения в лесном секторе, при внедрении Парижского соглашения в практику различных европейских стран.

В своей работе рассматриваем потенциал лесов в смягчении последствий изменения климата. Главной целью исследования является изучение устойчивого лесного лесопользования для создания экономики с минимальными углеродными потерями, предусмотренной Парижским соглашением по климату. Конечная цель заключается в оказании помощи лесопользователям по внесению большего вклада в смягчение последствий изменения климата.

Для достижения цели изучены пути преодоления потенциальных барьеров в лесной политике, которые могут мешать внедрению новых методов, направленных на увеличение климатических преимуществ лесов. В будущем планируется создать инновационную концепцию, нацеленную на стимулирование владельцев лесов по всей Европе применять такие методы лесоводства, что дают климатические преимущества.

Методы исследования

Использована схема комплексной оценки для определения взаимосвязей между климатом, лесным хозяйством, лесной промышленностью, экономикой, политическими условиями и возможными действиями по сокращению выбросов углерода и торговлей квотами на выбро-

сы парниковых газов на общеевропейском уровне.

Предполагается создание рабочих групп заинтересованных сторон, которые организуют обмен мнениями для дальнейшего создания руководства для субъектов лесного хозяйства. Чтобы начать совместный процесс обучения на различных уровнях, необходимо создать коалицию исследователей и заинтересованных сторон, которые совместно определят предпосылки и ключевые факторы нового устойчивого лесного хозяйства в условиях изменения климата. В трёх европейских странах будут апробированы модели определения углеродных потоков в лесу и древесной производственно-сбытовой цепочки (см. рисунок). Рост леса моделируется в CALDIS (Braun et al., 2016), взаимодействия в древесной производственно-сбытовой цепочке моделируются в FOHOW2 (Версия 2 для лесного хозяйства и лесной промышленности; Braun et al, 2016). Таким образом, содержание углерода в почве может быть оценено с входными данными из CALDIS с использованием модели почвенного углерода YASSO (Liski et al., 2005). FOHOW2 использует необходимые данные о жизненном цикле лесов, которые прменяются для определения замещённых выбросов. Горизонт моделирования для всех расчетов – 2100 год. Для оценки способов производства лесоматериалов (“Harvested Wood Products” в соответствии с МГЭИК) и дальнейшего использования древесины в Австрии опираются на информацию о производстве древесины отечественного про-

Модели для определения углеродных потоков

Динамика фитоценозов моделировалась с помощью модели роста лесов CALDIS. Эта модель не зависит от площади и основывается на модели роста отдельного дерева. Модели роста леса на основе отдельного дерева обычно состоят из видоспецифичных функций роста, естественного отпада и регенерации. Эти функции используются для прогнозирования развития каждого отдельного дерева на лесном участке. Характеристику лесного участка получают путем объединения значений отдельных деревьев. Из-за высокой гибкости модели роста

леса можно моделировать развитие лесных насаждений любого состава: от однопородных одновозрастных до смешанных разновозрастных. CALDIS состоит из модели прироста площади сечения и модели прироста высоты, которые чувствительны к температуре и атмосферным осадкам. CALDIS дополнительно содержит модели прироста количества деревьев, достигших диаметра рубки за определённый период. Это используется для определения количества этих деревьев. Кроме того, модель оценивает естественный отпад, а также потери запаса при рубках ухода, ветровалах, усыхании деревьев. Yasso07 является упрощенной моделью для моделирования запасов углерода в почве (Liski et al., 2005). Ядро Yasso07 представляет собой модуль разложения, где органическое вещество превращается в CO_2 и органические вещества в почве. Результатом работы Yasso07 является общий запас углерода в двух пулах: мёртвой древесине и органическом веществе почвы. Входные параметры модели – характеристики климата и начальные запасы мертвого органического вещества. FOHOW2 – модель частичного динамического равновесия (Northway et al., 2013) лесного сектора, имитирующая производственно-сбытовую цепочку в Австрии. Она используется для изучения долгосрочного развития австрийского лесного сектора (Stern et al., 2015; Schwarzbauer, Stern, 2010; МГЭИК, 2014) и ориентируется в основном на анализ сценариев воздействий различных решений (Hurmekoski, Hetemäki, 2013). Подробное описание модели можно найти у Шварцбауэра и Штерна (2010). FOHOW2 делится на две подгруппы моделей, состоящих из восьми модулей:

1.1. *Общая экономика* , которая включает экзогенные движущие силы рынка (валовой внутренний продукт, население). Товарные рынки взаимодействуют между собой с учетом экономической ситуации в лесном секторе.

1.2. *Рынки лесной продукции* , включающие в себя предложение, спрос, цены и товарооборот для каждого промежуточного изделия.

1.3. *Лесное хозяйство*, включающее в себя поставку древесины из трех категорий собственности: мелких частных лесовладельцев (< 200 га), крупных частных лесовладельцев (≥ 200 га) и австрийских федеральных лесов.

1.4. *Рынки круглого леса* определяются взаимодействием модулей лесного хозяйства и рынков лесной продукции.

2.1. *Лесные ресурсы*, которые включают в себя площадь лесов, запасы древостоя, приросты, отдельно для хвойных и лиственных лесов, а также два возрастных класса и три категории собственности, упомянутые выше.

2.2. *Углеродные ресурсы леса*. Углерод рассчитывается из лесной биомассы на корню. Изменения аппроксимируются через прирост, запасы древесины и лесозаготовку.

2.3. *Углеродная промежуточная продукция*. Учитываются углеродные потоки от промежуточной продукции. Здесь моделируются только изменения, поскольку запасы углерода не учитываются для промежуточной продукции.

2.4. *Конечный углеродный продукт.* Учитывается углерод готовой продукции (ДСП, бумага, картон, пиломатериалы). Поступление рассчитывается из годового объема производства, в то время как расход определяется через коэффициенты разложения, полученные из руководящих принципов МГЭИК (Schwarzbauer, Stern, 2013).

Для расчета замещающих выбросов было использовано программное обеспечение GEMIS (Глобальная модель выбросов для комплексных систем), а также данные Рютера, Дилерихса и Баубука (Baubook, 2016). GEMIS - это программа анализа жизненного цикла и база данных для энергетических, материальных и транспортных систем (IINAS, 2015). GEMIS рассматривает как прямые, так и косвенные выбросы за полный цикл системы. GEMIS в основном используется для расчета коэффициентов выбросов замещающих материалов. Применение изделий из древесины разделено на две основные категории: энергия и замена материала. Заме-

на материала разделена на пять подкатегорий: производство мебели, упаковочного материала (например, деревянных ящиков), изготовление инструментов, строительство (например, лестниц), а также проектирование и строительство (например, окон).

Результаты и их обсуждение

Сравнивая ситуации в лесных секторах Австрии, Швеции, Финляндии, Италии и России, можно видеть, что все эти страны имеют достаточно высокую плотность лесного покрова. Однако по ряду других характеристик имеются принципиальные различия, например, в вариациях интенсивности лесоуправления в сочетании со структурами собственности леса. Поэтому в указанных странах в лесном секторе различны воздействия на климатическую функцию лесов, что делает сравнение очень полезными. Италия представляет пример южных территорий с большой долей субтропических сухих лесов и является образцовым регионом для южных европейских лесов. Именно в южной Европе следует ожидать максимальных изменений, вызванных глобальным потеплением.

Способность лесов содействовать смягчению последствий изменения климата зависит главным образом от интенсивности прироста фитомассы (Курбанов 2002; Lundmark et al., 2016). Этот чистый прирост может накапливаться в лесу или может быть зафиксирован в лесной продукции, которая способна заменить изделия, полученные в энергоёмких цепочках с использованием сжигания ископаемого топлива (бетон, сталь). Стратегия увеличения запасов углерода в лесах носит временный характер, так как лес может накапливать лишь ограниченное количество углерода. Чем старше лес, тем меньше его угдерододепонирующая способность. Замена длительно возобновляемых ресурсов древесиной может проводиться в течение неограниченного промежутка времени.

Чистая первичная продукция древесной биомассы в неуправляемых естественных насаждениях, как правило, небольшая. В структуре леса преобладают старые деревья, хотя запас углерода может быть высоким. Основная часть поглощенного углерода расходуется экосистемой вследствие гетеротрофного дыхания, что приводит к незначительному наращиванию запасов углерода. В управляемых лесах с одновозрастными или разновозрастными насаждениями чистая первичная продукция древесной биомассы в среднем выше. Также здесь в лесопользование могут быть вовлечены большие объёмы древесины. Рост деревьев в управляемых одновозрастных лесах характеризуется возрастанием годового текущего прироста до определённого предела. Именно в этот момент наиболее эффективным является изъятие из насаждения части запаса древесины. Управление разновозрастными насаждениями характеризуется частыми лесозаготовками, обычно каждые 5-15 лет и относительно стабильным текущим годовым приростом в долгосрочной перспективе. Распределение диаметров в разновозрастных управляемых насаждениях приближается к классической форме перевернутой J-образной кривой.

Углеродная нейтральность при использовании биомассы в управляемых лесных ландшафтах для производства биоэнергии должна быть поставлена под сомнение. Возможно получение больших климатических преимуществ, когда объём рубки не превышает величины чистого годичного прироста. Это противоречит климатической политике большинства стран, где сжигание биотоплива считается углеродно нейтральным.

Если чистый годовой прирост используется для увеличения запасов углерода, то климатические преимущества очевидны: отсутствуют выбросы углерода, связанные с заготовкой и переработкой. Как уже упоминалось выше, подход, основанный на консервации углерода в фитомассе лесов, носит временный характер. В долгосрочной перспективе способность леса накапливать углерод снижается. В противоположность этому эффект замещения имеет аддитивный характер и зависит от стратегии использования продукта. Если лесная биомасса используется для производства биоэнергии, то эффект замещения слабее, нежели эффект накопления углерода в лесу.

Результаты некоторых исследований показывают, что интенсивное лесопользование может иметь положительный климатический эффект (Braun et al., 2016; Lundmark et al., 2014). Баланс углерода зависит от того, как древесина используется в дальнейшей обработке и каков ассортимент продукции. Материальные потоки для производственно-сбытовой цепочки при возобновляемой сырьевой базе будут отслеживаться для сравнения с альтернативой невозобновляемого сырья.

Предлагаемая концепция эффективности смягчения последствий изменения климата (CCME, накопленные тонны CO_2-эквивалент/м^3 использованной древесины; Braun et al., 2016) будет проверена на уровне стран, поскольку данная концепция требует прогноза роста лесов при различных сценариях управления и использования лесов. Эти сценарии будут разработаны совместно с учётом мнений заинтересованных сторон. Модель роста европейских лесов (EFISCEN) не сможет предоставить надежные оценки для отдельных стран-партнеров Средиземноморья, альпийских и арктических экорегионов. Таким образом, предлагается инновационный способ учета региональных различий и перспектив смягчения последствий изменения климата.

Исследование включает следующие этапы для обеспечения интеграции европейского лесного сектора и заинтересованных сторон:

1. Оценка потенциала лесного сектора для более эффективного управления углеродом

Для повышения потенциала лесов в смягчении последствий изменения климата лесному сектору европейских стран, возможно, потребуется провести глубокие изменения в области управления и ведения лесного хозяйства, а также в области использования заготовленной лесной биомассы. Пределы изменений в управлении лесами должны быть определены на законодательном и исполнительном уровнях. Эти пределы будут различаться между странами.

2. Обеспечение устойчивости смягчения последствий изменения климата с помощью управления лесными ресурсами

Повышение эффективности мер по смягчению последствий изменения климата предполагается осуществить с внедрением экологически устойчивого лесопользования, включающего в себя поставки экономических, экологических и социальных экосистемных услуг. Различные экосистемные услуги требуют разных временных горизонтов при управлении лесными ресурсами. Следовательно, измерение времени является важным, но часто игнорируемым фактором, влияющим на оценку устойчивости лесопользования. Измерение времени выступает решающим фактором в разработке соответствующих критериев устойчивости лесопользования, полезного для климата.

3. Повышение эффективности смягчения последствий изменения климата в производственно-сбытовой цепочке, основанной на лесной продукции

Сравнения различных производственно-сбытовых цепочек лесной продукции помогают владельцам лесов выбирать альтернативные варианты для внесения своего вклада в будущую европейскую экономику с низким уровнем эмиссий углерода от сжигания ископаемого топлива и эффективным использованием биоресурсов. Необходимо моделировать эффективность смягчения последствий изменения климата для альтернативных производственно-сбытовых цепочек лесной продукции. Выбор методов ведения лесного хозяйства, определение временного горизонта управления лесами и конечное использование заготовленной биомассы будут влиять на эффективность мер по смягчению изменений климата. Эффективность этих мер, выраженная в углеродных единицах, может быть оценена и проверена на местном, региональном и национальном уровнях.

4. Инструменты для выявления и оценки дополнительных факторов

Продаваемые углеродные кредиты могут стать гибким инструментом создания экономических стимулов для вовлечения владельцев в новую систему лесопользования. Преодоление

экономических барьеров будет продвигать практику управления лесами на принципах парижского климатического соглашения.

В конечном счете, исследование предлагает инновационный метод для определения и оценки дополнительных факторов (оценка сокращения выбросов CO_2 в дополнение к современному управлению лесным хозяйством и конечному использованию лесной продукции). Таким образом, проект может быть полезен для владельцев лесов в регионах-партнерах (Скандинавия, Центральная Европа, Южная Европа, Сибирь) и для остальной части Европы, а также для сертифицирующих организаций, которые могут оценить действия владельцев лесов.

Заключение

Итак, рассмотрено, каким образом лесные экосистемы и лесоматериалы могут быть использованы для выполнения обязательств по парижскому климатическому соглашению. Использованы методы междисциплинарных исследований. Показана возможность создания общего плана действий для стран Европы в лесном секторе. Предложен инновационный инструмент, который даёт возможность эффективно оценивать режим лесопользования с точки зрения взаимодействия леса и климата. С научной точки зрения, комплексный подход, охватывающий весь лесной сектор и эффекты за пределами этого сектора (эффект смягчения последствий изменения климата и экономические последствия) обеспечат новый взгляд на лесной сектор, а также передовые идеи для органов лесоуправления. Практиков он обеспечит легкими для оценки индикаторами последствий их решений в управлении лесами.

Библиографический список

1. Курбанов, Э.А. Бюджет углерода сосновых экосистем Волго-Вятского района / Э.А. Курбанов // Йошкар-Ола, 2002. – 300 с.
2. К вопросу об углерододепонирующих насаждениях / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьёв, Л.С. Мошкина, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев // Вестник МарГТУ – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – 2008. – №3. – С. 5-17.
3. Курбанов, Э.А. Моделирование бюджета углерода лесных насаждений на примере сосняков Поволжья / Э.А. Курбанов // Лесной журнал, 2009. – № 2. – С. 7-15.
4. МГЭИК. Глава 2.8 Древесные продукты (HWP) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/pdf/KP_Supplement_Entire_Report.pdf. – 2014.
5. Baubook. Интернет-платформа для энергоэффективного и экологичного строительства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.url: http://www.baubook.info – (11.10.2016).
6. Braun, M. A holistic assessment of greenhouse gas dynamics from forests to the effects of wood products use in Austria. / M. Braun, D. Fritz, N. Braschel, R. Büchsenmeister, A. Freudenschuss, T. Gschwantner, R. Jandl, T. Ledermann, M. Neumann, W. Pölz et al. // Carbon Management (published online). – 2016. – URL: http://dx.doi.org/10.1080/17583004.2016.1230990.
7. Holtsmark, B. Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt / B. Holtsmark // Climatic change. – 2012. – № 112. – P. 415-428. – URL: 10.1007/s10584-011-0222-6.
8. Hurmekoski, E. Studying the future of the forest sector: Review and implications for long-term outlook studies / E. Hurmekoski, L. Hetemäki // For. Policy Econ. – 2013. – №34. – P. 17–29. – URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2013.05.005.
9. IINAS. GEMIS: Глобальная модель выбросов для интегрированных систем. строительства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.url: http://www.iinas.org/gemis.html - (12.11.2015).
10. IPCC. Chapter 2.8 Harvested Wood Products (HWP). In: 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. Hiraishi T, Krug T, Tanabe K, Srivastava N, Baasansuren J, Fukuda M, Trox- ler TG (Eds). IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. – 243 p. . – URL: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/pdf/KP_Supplement_Entire_Report.pdf.
11. Johnston, C.M. Back to the past: Burning wood to save the globe / C.M. Johnston, G.C. van Kooten // Ecological Economics. – 2015. – №120. – P. 185-193. – URL http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.10.008.
12. Keith, H. Under what circumstances do wood products from native forests benefit climate change mitigation? / H. Keith, D. Lindenmayer, F. Macintosh, B. Mackey // PloS one. – 2015. – №10(10). – P. 1-23. – URL: http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0139640.
13. Kilpeläinen, A. Net climate impacts of forest biomass production and utilization in managed boreal forests / A. Kilpeläinen, P. Torssonen, H. Strandman, S. Kellomäki, A. Asikainen, H. Peltola // GCB Bioenergy. – 2015. – № 8(2). – P. 307-216. – URL: 10.1111/gcbb.12243.
14. Liski, J. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils / J. Liski, T. Palosuo, M. Peltoniemi, R. Sievänen // Ecol. Modell. – 2005. – Vol. 189. – P. 168-182.

15.Lundmark, T. Potential roles of Swedish forestry in the context of climate change mitigation / T. Lundmark, J. Bergh, P. Hofer, A. Lundström, A. Nordin, B.C. Poudel, F. Werner // Forests. – 2015. – №5(4). – P. 557-578. – URL: http://www.mdpi.com/1999-4907/5/4/557/htm.

16. Lundmark, T. Comparison of carbon balances between continuous-cover and clear-cut forestry in Sweden / T. Lundmark, J. Bergh, A. Nordin, N. Fahlvik, B.C. Poudel // Ambio. – 2016. – № 45(2). – P. 203-213. – URL: http://link.springer.com/article/10.1007/s13280-015-0756-3.

17.Northway, S. Forest Sector Partial Equilibrium Models: Processing Components / S. Northway, G.Q. Bull, J.D. Nelson // For. Sci. – 2013. – №59 (2). – P. 151-156. – URL: http://dx.doi.org/10.5849/forsci.11-156.

18. Stern, T. Biorefineries impact on the Austrian forest sector: A system dynamics approach / T. Stern, C. Ledl, M. Braun, F. Hesser, P. Schwarzbauer // Technological Forecasting and Social Change. – 2015. – №91. – P. 311-326. – URL : http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2014.04.001.

19. Schwarzbauer, P. Energy vs. material: Economic impacts of a “wood-for-energy scenario” on the forest-based sector in Austria — A simulation approach. / P. Schwarzbauer, T. Stern // For. Policy Econ. – 2010. – № 12(1). – P. 31-38. – URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2009.09.004.

20. Schwarzbauer, P. Economic crises: Impacts on the forest-based sector and wood-based energy use in Austria / P. Schwarzbauer, S. Weinfurter, T. Stern, S. Koch // For. Policy Econ. – 2013. – № 27. – P. 13–22. – URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2012.11.004.

21. Torssonen, P. Effects of climate change and management on net climate impacts of production and utilization of energy biomass in Norway spruce with stable age class distribution / P. Torssonen, A. Kilpeläinen, H. Strandman, S. Kellomäki, K. Jylhä, A. Asikainen, H. Peltola // GCB Bioenergy. – 2015. – № 8(2). – P. 419-427. – URL: 10.1111/gcbb.12258.

УДК 630*58

МОНИТОРИНГ НАРУШЕННОСТИ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ

Ю.А. Полевщикова, О.Н. Воробьев
Поволжский государственный технологический университет

На примере Среднего Поволжья проведена оценка нарушенности лесного покрова за 1985 -2014 гг., на территории республик Марий Эл, Чувашии, Татарстана и Нижегородской области. Для проведения классификации и тематического картирования подобрана серия разновременных мультиспектральных спутниковых снимков среднего разрешения системы Landsat за исследуемый период. Получена интегрированная карта современного состояния лесов и их нарушенности, которая представляет пространственную корреляцию исследуемых мультиспектральных данных. В работе использован алгоритм оценки распределения и пространственной взаимосвязи (автокорреляции) объектов лесного покрова, полученный на основе многофакторного анализа данных. Для каждого из исследуемых факторов рассчитывалась плотность пространственного распределения оцениваемого явления (фактора) и его весового коэффициента. Ситуационные карты, созданные в программном комплексе ArcGIS 10.3 методом двумерного статистического анализа (Bivariate statistical analysis), показывают изменения в лесном покрове и их отсутствие на объектах местности с течением времени. Полученная тематическая карта динамики лесного покрова отражает пространственное распределение классов - уменьшения (7,5%), увеличения (11,4%) и неизменное состояние лесного покрова (32,9%) на территории исследования. В результате анализа тематической карты нарушенности лесного покрова за период 1985-2014 гг. установлен низкий уровень лесных нарушений в Нижегородской области (4,6%) и высокий уровень нарушений на северной части сцены спутникового снимка, где расположена Республика Марий Эл (59,8%). Наибольшая площадь (85120,65 га) нарушенности лесного полога выявлена за период с 2010 по 2014 г. Проведенный мониторинг нарушенности лесного покрова по интегрированной карте современного состояния лесов показал пространственную неоднородность нарушений на лесной территории. Наиболее выраженные участки нарушенности представлены на территории Медведевского района Республики Марий Эл, где пожарами были охвачены огромные территории лесных насаждений. Закономерность не случайности данных явлений обуславливается их проявлением на определённых участках возрастной структурой насаждений и развитостью дорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: *лесной покров, нарушенность, дистанционный мониторинг, Landsat, спутниковые снимки, ситуационные карты*

MONITORING OF FOREST COVER DISTURBANCE WITH THE USE OF SATELLITE IMAGES

Y.A. Polevshchikova, O.N. Vorobiev
Volga State University of Technology

The study of the estimation of the forest area disturbance in the Middle Volga region for the period 1985-2014 has been carried out. The area of the research which covers the territory of the Mari El Republic, Chuvashia, Tatarstan and the Nizhny Novgorod region is shown. A series of multispectral satellite images of different time shooting and medium resolution Landsat is selected for a further work. An integrated map of the current state of forests and their disturbance representing a spatial correlation study multispectral data is obtained. The paper shows the algorithm of ion the distribution and spatial relationships (autocorrelation) of objects of forest cover estimation, based on the multivariate data analysis. For each of discovered factors the density of spatial distribution of the estimating event (factor) and its weighting factor is calculated. Situational maps, created in software package ArcGIS 10.3 by two-dimensional statistical analysis (Bivariate statistical analysis), show changes in the forest cover and theirs lack on the objects over time. Created thematic map of the forest cover dynamics represents the spatial distribution of the reduction (7,5%), increase (11,4%) and the stable state of forest cover (32,9%) classes in the study area. The analysis of the thematic map of the forest cover disturbance for the period 1985-2014 determined a low level of the forest disturbances in the Nizhny Novgorod region (4,6%) and a high level of the disturbances in the northern part of the satellite image scene – the Mari El Republic (59,8%). The largest area (85120,65 ha) of the forest cover disturbance is identified during the period from 2010 to 2014. The monitoring of the forest cover disturbance based on the integrated map of the current state of the forests shows the spatial heterogeneity of the disturbances in the forest area. Strongly pronounced areas of the disturbance are presented in the territory of Medvedevo District of Mari El Republic, which were enveloped by huge fires. The phenomenon of these events non-randomness is caused by their manifestation in certain areas depended of the age structure of forests and development of road infrastructure.

Keywords: *forest cover, disturbance, remote sensing, dynamic, satellite images.*

Введение

В результате антропогенных и природных процессов лесной покров подвержен постоянным изменениям, которые также усугубляются в результате чрезвычайных ситуаций. В лесных насаждениях происходят возрастные изменения, вызванные сменой пород, гибелью древостоев и других процессов, которые определяют естественную динамику лесного покрова. Причины и масштабы антропогенных и природных факторов, отвечающих за динамику лесных экосистем, разнообразны: вырубка лесных древостоев, воздействие пожаров, массовое поражение лесной растительности болезнями, изменение климата (Воробьев и др., 2014; Kim et al., 2014; Krylov et al., 2014). Исследования данных проблем особенно актуальны для лесного региона Среднего Поволжья (Губаев и др., 2011; Loboda et al, 2012; Воробьев и др., 2016). За последние десятилетия леса были подвергнуты сильным пожарам, засухам, приведшим к их усыханию, ветровалам и буреломам (Kurbanov, Post, 2002; Курбанов, Воробьев, 2014). Решение данных вопросов и изучение масштабов пространственно-временных нарушений требует применения современных подходов пространственно-временного анализа и детального мониторинга состояния лесного покрова с использованием данных спутниковой съемки (Курбанов и др., 2010; Курбанов и др., 2016; Миклашевич, Барталев 2016).

Научные коллективы во всем мире (Австралия, Индия, Китай, страны ближнего и дальнего зарубежья, Европы, Канада и США) вырабатывают различные подходы к решению проблемы оценки нарушенности лесного покрова, вызванной глобальными изменениями климата и деятельностью человека (Hostert et al., 2011; Plungmacher et al., 2014). Этому процессу

способствует стремительное развитие современных технологий дистанционного зондирования и геоинформационных систем. Много исследований с использованием разновременных спутниковых снимков проводится для оценки нарушенности, прогнозирования изменений и определения основных факторов, влияющих на динамику лесного покрова (Meng et al., 2015; Sulla-Menashe et al., 2014; Xin et al., 2013). В Российской Федерации основным фактором, влияющим на нарушенность лесов и снижение их лесистости, было исторически сложившееся интенсивное лесопользование (Воробьев и др., 2015; Loboda et. al., 2016). Кроме того, объектом нарушенности большинства хвойных насаждений являются вспышки численности насекомых-вредителей на площадях гарей и крупные лесные пожары. Несмотря на все существующие данные о лесных пожарах, лесозаготовках и массовых размножениях насекомых, достоверную информацию о них найти трудно (Курбанов, 2002). В основном такие сведения представляют собой сводные данные по лесной инвентаризации, сельскому хозяйству и исторических карт-схем. Поэтому вновь полученные тематические карты нарушенности лесного полога по данным спутниковой съемки могут иметь важное практическое значение для различных отраслей народного хозяйства в Среднем Поволжье.

Целью исследования было разработать методику и провести оценку нарушенности лесного покрова на примере Среднего Поволжья с использованием данных спутниковой съемки среднего разрешения.

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

- анализ территории исследования,
- разработка методики оценки нарушенности лесов,
- подбор спутниковых снимков,
- разработка тематических карт нарушенности лесного покрова,
- моделирование динамики лесного покрова с учетом его нарушенности методами геостатистики в среде ArcGIS.

Объект и методы исследования

Территория исследования

Для оценки нарушенности лесного покрова была использована сцена спутникового снимка Landsat, расположенная в центрально-восточной части Восточно-Европейской (Русской) равнины. Исследуемая сцена охватывает территории республик Марий Эл, Чувашии, Татарстана и Нижегородской области (рис. 1). Дешифрирование и оценка пространственного распределения нарушенных лесных участков проводились для сцены Landsat (172p21r), где леса охватывают большую часть территории Марий Эл и Чувашии.

Спутниковые снимки

Для долгосрочного мониторинга лесного покрова наиболее перспективны спутниковые снимки системы Landsat, которые представляют собой универсальные данные для изучения глобальных изменений, наблюдения за поверхностью Земли и картирования больших площадей растительного покрова (Курбанов и др., 2014). Для решения вопросов данного исследования в международной системе WRS-2 (Worldwide Reference System) была подобрана серия разновременных мультиспектральных спутниковых снимков (Landsat 4, 5, 7, 8 TM, ETM+ и OLI) на территорию исследования за вегетационные периоды с 1985 по 2014 гг. (табл. 1).

Все спутниковые снимки прошли атмосферную коррекцию (Atmospheric Correction Module) в программном комплексе ENVI-5.2. Радиометрическая и геометрическая обработка уровня 1G выполнялась для спутниковых снимков с использованием значений калибровочных коэффициентов. Для дешифрирования объектов лесного покрова разновременные спутниковые снимки прошли процедуру линейного преобразования координат пространства спектральных признаков «Tasseled Cap» («Колпачок с кисточкой») (Курбанов и др., 2015).

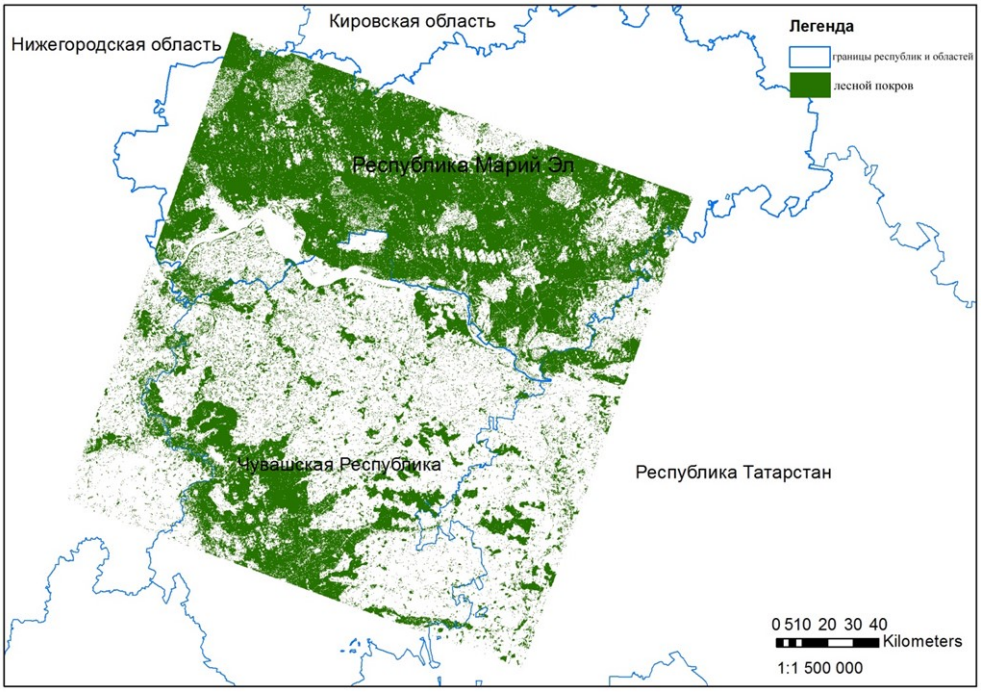


Рис. 1. Изучаемая территория исследования лесного покрова Среднего Поволжья на сцене спутникового снимка Landsat

Таблица 1

Спутниковые снимки, использованные для картографирования лесного покрова

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

Оценка динамики лесного покрова

В работе были использованы ситуационные карты (Dorman, 2007), которые показывают изменения или их отсутствие на объектах местности с течением времени. Для лесного покрова на таких картах показаны три сценария:

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

Анализ проводился в программном комплексе ArcGIS 10.3 с помощью метода двумерного статистического анализа (Bivariate statistical analysis). В работе были использованы тематические карты с градацией на два класса: «лесной покров» и «нелесной покров». Класс «лесной покров» был сформирован в результате объединения классов лесных насаждений за 1985-2014 гг.

Оценка вновь полученной карты динамики лесного покрова (рис. 2) проводилась методом сравнения двух коэффициентов: W^+ (признак «нарушения» присутствует) и W^- (признак «нарушения» отсутствует). Разность между этими показателями, называемая в пространственно-временном анализе «контрастом», представляет собой обобщенную меру связи между объектами в пространстве и исследуемым признаком: $C = W^+ - W^-$. По значениям данных

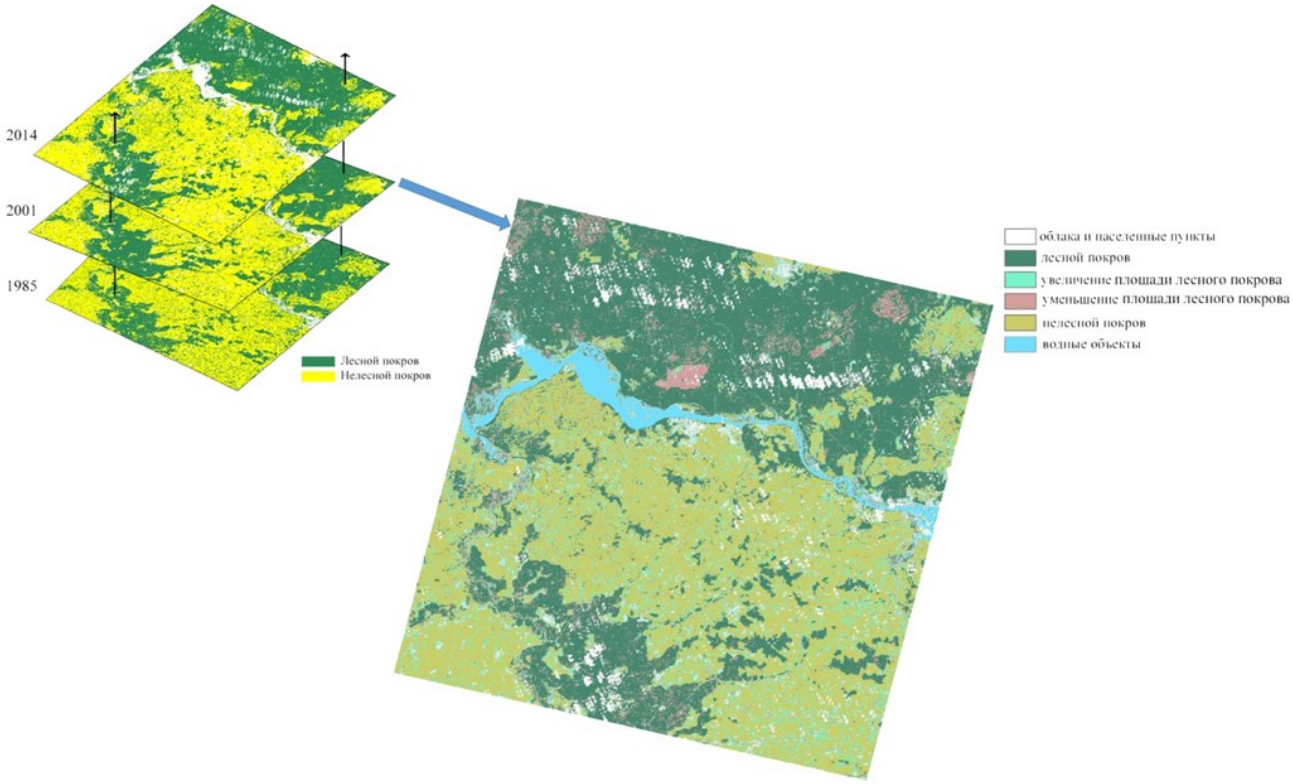


Рис. 2. Комплексная карта динамики (КД) лесного покрова

показателей и контрасту судят о наличии и силе взаимосвязи между точками и явлениями (признаками).

Дешифрирование нарушенности лесного покрова

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

Общее распределение нарушений лесного покрова представлено тематическими классами в пределах изучаемой сцены (рис. 3).

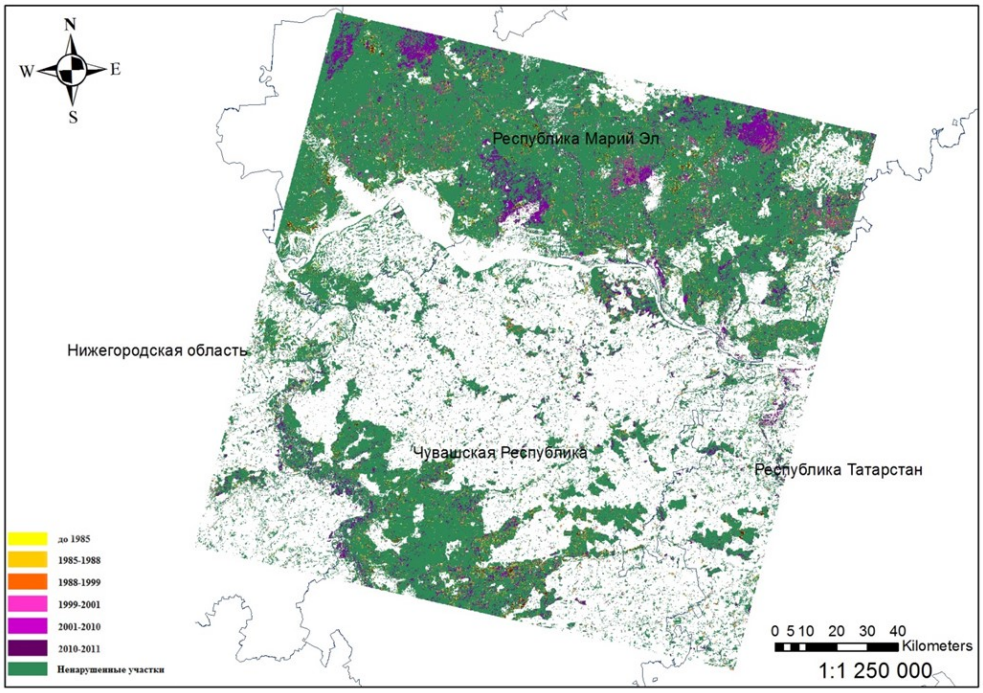


Рис. 3. Тематическая карта нарушенности (Disturbance Index, DI) лесного покрова за 1985-2014 гг.

Интегрированная карта нарушений

Для дальнейшей работы был использован алгоритм оценки распределения и пространственной взаимосвязи (автокорреляции) объектов лесного покрова, полученный на основе многофакторного анализа зависимости интегрированного показателя нарушенности лесного покрова исследуемой территории от ее других пространственных параметров.

Для этого был применен алгоритм геопространственного анализа тематических растровых данных, позволяющий определить степень корреляции между показателями выявленных нарушений лесного покрова в Среднем Поволжье и различными факторами, влияющими на эти нарушения. Тематические карты таких факторов формировались индивидуально, с помощью множественных критериев на основе априорных данных и данных экспертного анализа (Malczewski, 2006).

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

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

Для каждого из исследуемых факторов рассчитывалась плотность пространственного распределения оцениваемого явления (фактора) и его весового коэффициента (Ranjan et al., 2008). С этой целью для каждого оцениваемого явления была проведена процедура перекласс-ификации изучаемых факторов с целью последующего определения градации их плотности.

Оценка степени влияния весового фактора (для тематической карты DI – 2 класса градации) на изменения, произошедшие на исследуемой территории за 29 лет (с 1985 по 2014 гг.), проводилась в программном комплексе ArcGIS 10.3. Для этого определялось попиксельное совпадение каждого класса карты нарушенности (DI) с каждым классом карты динамики лесного покрова (рис. 4). Таким образом, были получены данные по совпавшим пикселям слоя DI «класс 1» и слоя КД «класс 1» (табл. 2). Такая процедура повторялась для всех изучаемых классов каждого слоя.

Таблица 2

Данные соотношения частот и весового коэффициента фактора DI для класса 0 карты динамики

ID	Класс	Σпикс	Σсовпикс	Спикс	Фпикс	Вес
1	Class 0	34586262	2365482	0,068394	15,27633581	-2,349
2	Class 1	1587261	2463	0,001552	15,27633581	-3,9932

Здесь ID – номер класса независимого фактора (тематическая карта DI);

Класс – название класса независимого фактора;

Σпикс – количество пикселей каждого класса карты DI за 29 лет;

Σсовпикс – количество совпавших пикселей двух классов сравниваемых карт;

Спикс – соотношение nslpix/ncpix;

Фпикс – соотношение количества пикселей класса исследуемого фактора к общему количеству пикселей сцены;

Cp/Pp – отношение значений Con_prob/ Prior_prob;

Вес – ln(Cp/Pp) – весовой коэффициент исследуемого фактора, рассчитанный для всего спутникового снимка.

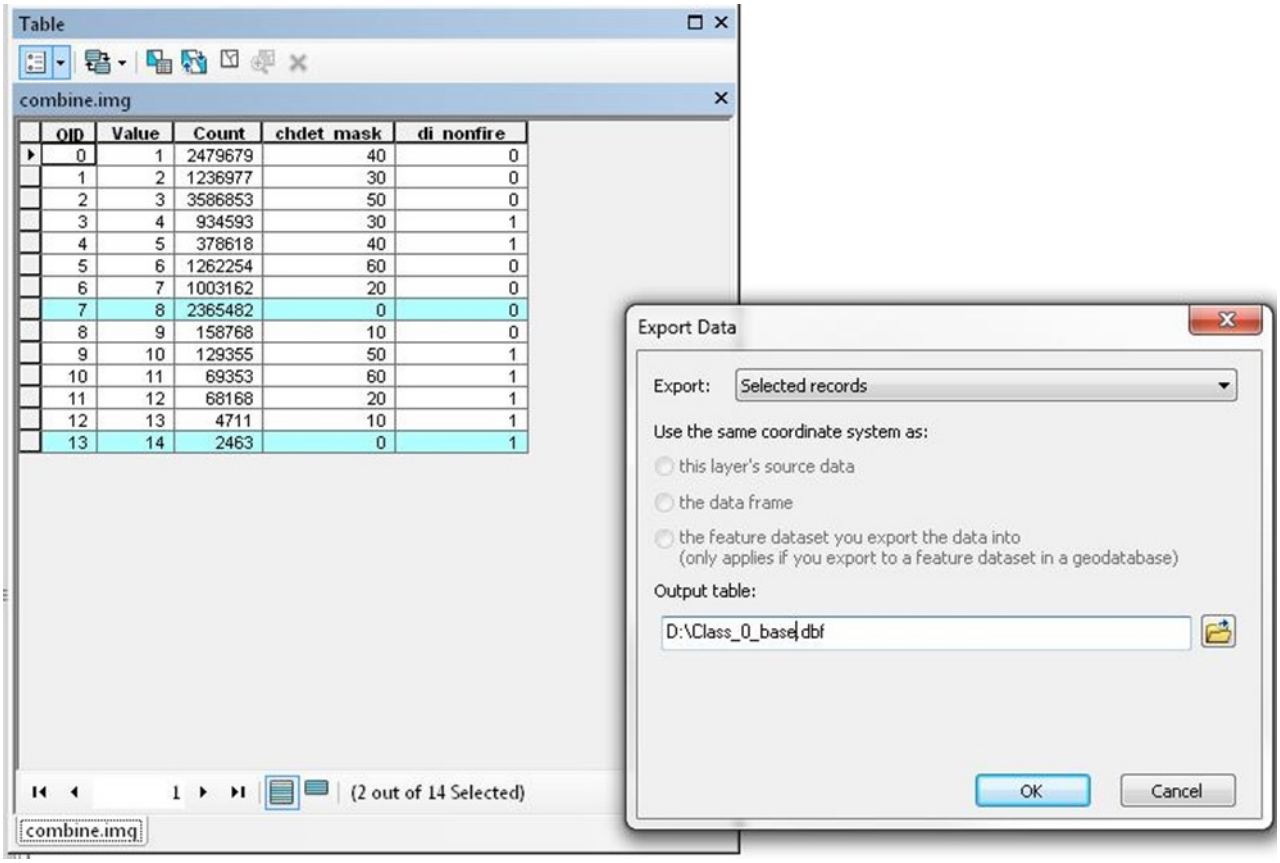


Рис. 4. Выборка одного класса слоя «DI» для определения количества совпавших пикселей

Полученные в работе весовые коэффициенты для каждого тематического класса изучаемого фактора интерполировались на всю сцену спутникового снимка Landsat и суммировались для получения итоговой растровой карты (рис. 5). Процесс интерполяции каждого весового коэффициента на всю сцену спутникового снимка Landsat позволяет получить тематические карты растровых пространственных значений для всех факторов, влияющих на динамику лесного покрова. В результате такие карты были созданы для каждого изучаемого фактора (параметра).

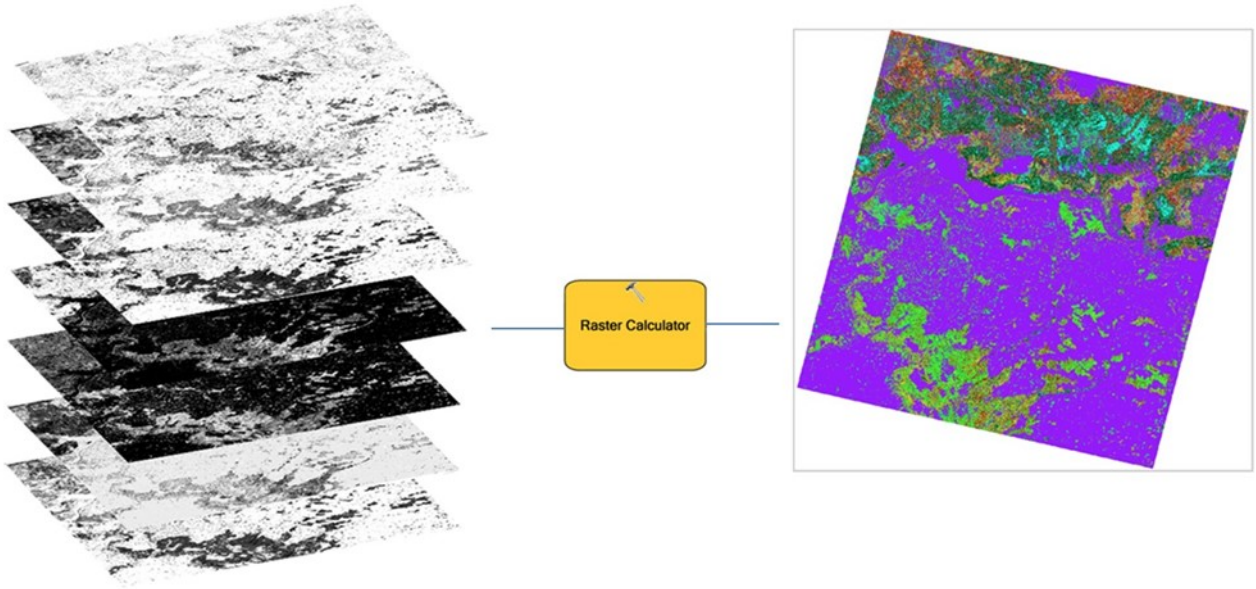


Рис. 5. Создание растровой карты нарушенности лесного покрова

В дальнейшем все полученные карты интегрировались в одну результирующую, по которой в целом дается комплексная оценка динамики нарушенности лесного покрова на исследуемой спутниковой сцене (рис. 6). Данная карта показывает кумулятивное накоплений всех нарушенностей лесного полога в изучаемом регионе. Результирующие значения весовых показателей представляют градацию плотности событий внутри оцениваемой территории. Границы интерполированных классов определяют большую или меньшую зависимость рассматриваемых объектов набора данных.

Рис. 6. Интегрированная карта нарушенности динамики лесного покрова Республики Марий Эл

Результаты и выводы

Полученная тематическая карта динамики лесного покрова показывает пространственное распределение классов - уменьшения (7,5%), увеличения (11,4%) и неизменное состояние лесного покрова (32,9%) на территории исследования. Тематическая карта нарушенности лесного покрова за период 1985-2014 гг. свидетельствует о минимальном уровне лесных нарушений по снимкам Landsat в Нижегородской области (4,6%) и Республике Татарстан (6,1%). Наибольшая часть нарушений приходится на северную часть сцены спутникового снимка, где расположена Республика Марий Эл (59,8%). Значительные нарушенные лесные территории, охватывающие южную часть сцены Landsat, приходятся на Чувашскую Республику (29,5%). В основном нарушенные лесные объекты представлены отдельными участками (вырубки, усыхающие древостои) или большими площадями (гари 2010 г.). Значительные площади нарушений в 80-е годы являются чаще результатом проведения интенсивных сплошнолесосечных работ (Сухих и др., 2006), где в дальнейшем проводились лесовосстановительные работы (Денисов и др., 2015; Романов и др., 2013). За период с 2010 по 2014 гг. выявлена наибольшая площадь (85120,65 га) нарушенности лесного полога, обусловленная результатом антропогенного и природного воздействия (Полевщикова, 2015).

Интегрированная карта нарушений динамики лесного покрова показывает кумулятивное накопление всех нарушений лесного покрова. Наиболее выраженные участки нарушений (границы весовых значений ниже -50,4) выявлены на территории Медведевского района, в котором большие территории лесных насаждений были охвачены пожарами. Влияние пожаров и ветра, имеющих стохастический (случайный) характер на лесной покров, может иметь место в любом насаждении исследуемой территории. Неоднородность кластеризации лесных участков связана с неоднородностью распределения лесов разной возрастной категории.

Проведенная оценка пространственной неоднородности территории позволяет говорить о неслучайности данных явлений, что обуславливается их проявлением на определённых участках, возрастной структурой насаждений и развитостью дорожной инфраструктуры. Например, лесным пожарам, в первую очередь, подвержены относительно однородные по составу хвойные насаждения разного класса возраста. Ветровалы обычно происходят в лесных насаждениях старшего возраста и средней полноты, расположенных на открытых, равнинных участках. Интенсивная вырубка ведется в насаждениях прежде всего целевых пород, имеющих возраст хозяйственной спелости. В изучаемом регионе к ним относятся однородные спелые и перестойные хвойные насаждения.

Анализ полученных результатов свидетельствует о существенном влиянии нарушенностей и пожаров на изменения в лесном покрове. Пространственная корреляция исследуемых мультиспектральных данных представлена в виде интегрированных карт современного состояния лесов и их динамики. Дальнейшее моделирование процессов лесопользования будет важно с точки зрения прогнозирования состояния и биологической продуктивности лесных ресурсов. Результаты картирования динамики количественных показателей пространственных данных могут быть использованы при оценке пространственных нарушений (вероятных рисков) изучаемой территории.

Работа выполнена по проекту № 2394 «Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем» в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации 2014-2016 гг.

Библиографический список

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

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

3. Воробьев, О.Н. Методика пошаговой классификации спутниковых снимков для тематического картирования лесов / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, Е.Н. Демишева // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 4(28). – С. 57-69.

4. Губаев, А.В. Классификация наземного покрова Среднего Поволжья по спутниковым снимкам среднего разрешения / А.В. Губаев, Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международного научно-практического семинара [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – С.7-19.

5. Денисов, С.А. Управление лесовосстановлением на гарях / С.А. Денисов, Т.А. Конюхова, Т.С. Рачкова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2015. – № 3 (27). – С. 5-14.

6. Курбанов Э.А. Лесоводство. Международное лесное хозяйство: учебное пособие / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев // Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. – 254 с.

7. Курбанов, Э.А. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 1. – С.36-48.

8. 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.

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. Пространственная динамика фитомассы березняков на бывших сельскохозяйственных землях Марийского Заволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьёв, Л.С. Устюгова, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев // Лесной журнал. – Архангельск: Архангельский государственный технический университет. – 2010. – №3. – С. 8-14.

11. Курбанов, Э.А. Бюджет углерода сосновых экосистем Волго-Вятского района / Э.А. Курбанов // Йошкар -Ола: МарГТУ, 2002. – 300 с.

12. Миклашевич, Т.С Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных / Т.С. Миклашевич, С.А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 9-24.
13. Полевщикова, Ю.А. Пространственная динамика лесного покрова на примере Кировской области по данным дистанционного зондирования / Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международной конференции. – Йошкар-Ола: ПГТУ. – 2015. – С.10-16.
14. Сухих, В.И. Научные основы и первые результаты дистанционного мониторинга незаконных рубок леса / В.И. Сухих, М.Д. Гиряев, В.И. Архипов, Е.М. Атаманкин, В.И. Березин, М.В. Дворяшин, В.М. Жирин, И.М. Потапов, В.М. Скудин, А.А. Соболев, А.В. Шаталов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Том 3, № 1. – С. 32-38.
15. Dorman, C. Effects of incorporating spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data / Carsten F. Dormann // Global Ecology and Biogeography. – 2007. – №16. – P. 129-138.
16. Hostert, P. Rapid land use change after socio-economic disturbances: the collapse of the Soviet Union versus Chernobyl / P. Hostert, T. Kuemmerle, A. Prishchepov, A. Sieber, E.F. Lambin, V.C. Radeloff // Environmental Research Letters. − 2011. − №6 (4). – 8 p.
17. Kim, D. Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000 / Do Kim, Joseph O. Sexton, Praveen Noojipady, Chengquan Huang, Anupam Anand, Saurabh Channan, Min Feng, John R. Townshend // Remote Sensing od Environment. – 2014. – №155. – P. 178-193.
18. Krylov, A. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002-2011 / A. Krylov, J.L. McCarty, P. Potapov, T. Loboda, A. Tyukavina, S. Turubanova, M. Hansen // Environmental research letter. – 2014. – Vol. 9. – P. 1-8.
19. 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. – № 1-2. – Vol. 55. – P. 157-171.
20. 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. – Springer International Publishing. – 2016. – P. 173-192.
21. 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.
22. Malczewski, J. GIS-based Multicriteria decision analysis: a survey of the literature / J. Malczewski // International Journal of geographical Information Science. – 2006. – Vol. 20. – №7. – P. 703-726.
23. Meng, R. Effects of fire severity and post-fire climate on short-term vegetation recovery of mixed-conifer and red fir forests in the Sierra Nevada Mountains of California / R. Meng, P. Dennison, C. Huang, M. Moritz, C. D'Antonio // Remote Sensing of Environment. – 2015. – Vol. 171. – P. 311-325.
24. Plungmacher, D. Using Landsat-derived disturbance and recovery history and lidar to map forest biomass dynamics / D. Plungmacher, W. Cohen, R. Kennedy, Z. Yang // Remote Sensing of Environment. – 2014. – Vol. 151. – P. 124-137.
25. Ranjan, K. D. GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping / Ranjan K. D. // Environ Geology. – 2008. – №54. – P. 311-324.
26. Sulla-Menashe, D. Detecting forest disturbance in the Pacific Northwest from MODIS time series using temporal segmentation / D. Sulla-Menashe, R. Kennedy, Z. Yang, J. Braaten // Remote Sensing of Environment. – 2014. – Vol. 151. – P. 114-123.
27. Xin, Q. Toward near real-time monitoring of forest disturbance by fusion of MODIS and Landsat data / Q. Xin, P. Olofsson, Z. Zhu, B. Tan, C. Woodcock // Remote Sensing of Environment. – 2013. – Vol. 135. – P. 234-247.

УДК 630*181.9

ЭМИССИЯ УГЛЕРОДА С ПОВЕРХНОСТИ ФРАГМЕНТОВ ВАЛЕЖА РАЗНЫХ КЛАССОВ РАЗЛОЖЕНИЯ

А.В. Иванов, С.Ю. Лошаков
Приморская государственная сельскохозяйственная академия

Представлены результаты натурных измерений эмиссионных потоков углерода с поверхности валежа разных классов разложения в условиях хвойно-широколиственных лесов южного Приморья. Выявлено увеличение дыхания по мере перехода фрагментов валежа из первого класса в пятый. Древесина твердолиственных пород (дуб монгольский, ильм японский) выделяет CO_2 в 1.5-2 раза интенсивнее, чем древесина сосны кедровой корейской. В 2015 г. удельное дыхание валежа дуба было на 20.2 % больше, чем в 2016 г., соответственно ильма – на 1.1 %, кедра – на 6.4 %. Вероятно, это уменьшение связано с более длительными периодами без дождей в 2016 г. Средние за два года значения эмиссии составили: дуб – 6.5 г С/(м^2×сут.), ильм – 5.0 г С/(м^2×сут.), кедр – 3.1 г С/(м^2×сут.). Таким образом, дыхание валежа ильма в 1.6 раза интенсивнее, чем кедра; а дуба соответственно в 2.1 раза.

***Ключевые слова**: крупные древесные остатки, изменение климата, валёж, углерод, классы разложения древесины.*

CARBON EMISSIONS FROM SURFACE FRAGMENTS OF LYING DEADWOOD IN VARIOUS STAGES OF DECAY

A.V. Ivanov, S.Y. Loshakov
Primorskaya State Academy of Agriculture

We present carbon-flow emissions from field measurements of surface fragments of lying deadwood in various stages of decay in mixed coniferous-broadleaved forests of southern Primorsky Krai. An increase of respiration was found during the transition of lying deadwood from the first stage of decay to the fifth. Timber from broadleaved hardwood species (Mongolian oak, Japanese elm) emits CO2 1.5-2 times faster than timber from Korean pine. In 2015 the carbon respiration of coarse woody debris from oak trees was 20.2% higher than in 2016. Correspondingly, elm was 1.1% higher and cedar 6.4%. Probably this effect is attributable to longer periods without rain in 2016. The average emissions for the two years are as follows: Oak – 6.5g C/(m³×day), elm – 5.0g C/(m²×day), cedar – 3.1 g C/(m²×day). Thus, respiration of coarse woody debris from elm trees was 1.6 times higher than from cedar and 2.1 times higher than from oak respectively.

***Keywords:** coarse woody debris, lying deadwood, changing of the climate, carbon, decay stages.*

Парижское климатическое соглашение (2015) Рамочной конвенции ООН об изменении климата вызвало новую волну исследований по проблеме инвентаризации углеродного бюджета лесов. В современных публикациях ведущих учёных, представляющих свои модельные и натурные оценки статей углеродного бюджета (Курбанов, 2009) для лесных экосистем России, наметилась тенденция к сходимости результатов, однако до настоящего времени не создана полная единая база данных по инвентаризации запасов и потоков углерода. Среди основных пулов углерода в лесах наименее изученным остаются крупные древесные остатки (КДО). В деструкционном потоке углекислого газа в лесных растительных сообществах значительная доля приходится на разложение мёртвой древесины (Замолодчиков, 2009; Курбанов, Воробьев, 2008).

Древесные остатки (древесный детрит), являющиеся неотъемлемой частью лесных экосистем, представляют собой второй по величине резервуар углерода после живой фитомассы (Пулы и потоки…, 2007). Крупные древесные остатки присутствуют в лесных насаждениях в виде валежа и сухостоя. По имеющимся в литературе данным соотношение валёж/сухостой в лесных насаждениях в среднем составляет 0.65/0.35 (Замолодчиков, 2009; Швиденко и др., 2014). Валеж представляет собой деревья и части их стволов, лежащие на поверхности почвы. Экологическая функция валежа состоит в поддержании биоразнообразия, обеспечении лесовозобновления, аккумуляции влаги. Валеж формируется в результате ветровалов, буреломов и естественного выпадения сухостоя. Пул органического углерода отпавшей древесины в лесных экосистемах России по современным оценкам составляет 3-5 % общего запаса углерода лесов (Курбанов, 2002; Швиденко и др., 2014). Процессы деструкции валежной древесины приводят к формированию значительного потока углекислого газа в атмосферу (Мухин, Воронин, 2007).

Для решения задачи оценки общей годичной эмиссии углерода с поверхности валежа на единице площади насаждения необходимо выполнить два отдельных исследования: определить запасы валежа по породам и классам разложения (Курбанов, Кранкина, 2001) с выявлением площади поверхности фрагментов и определить сезонную динамику удельного дыхания валежа у древесных пород также с учётом класса разложения. Известно, что по мере де-

струкции свежего валежа изменяются его физико-химические свойства: плотность, влажность, содержание макро- и микроэлементов (Mukhortova, 2012). Разложение древесины в основном происходит путём микогенного ксилолиза (Мухин, Воронин, 2007). В исследовании Т.И. Сафоновой (2013) анализировался состав родов грибов на валеже осины в зависимости от возраста валежа. По мере перехода валежа из одного класса разложения в другой увеличивается число родов грибов-деструкторов. Свежий валеж разлагается только одним родом грибов – *Foliota*, спустя 10-15 лет на валежной осине насчитывалось уже 14 родов грибов (Сафонова, 2002). Очевидно, что потоки углерода с единицы площади валежа разных классов разложения будут различными, и при полевых измерениях эмиссий следует дифференцировать валёж на классы. Публикации, посвящённые натурным измерениям дыхания валёжной древесины, крайне малочисленны. В исследовании С.С. Сафонова с соавторами показано, что интенсивность выделения CO_2 с поверхности валежа 3-го класса разложения примерно в 3 раза выше, чем с поверхности валежа 1-го класса (Сафонов и др., 2012).

Региональные оценки потоков углерода от разложения валежа, с одной стороны, позволяют более полно познать специфику продукционного процесса и круговорота углерода в лесах, с другой – уточнить процедуры инвентаризации парниковых газов путём введения в действующие модели более актуальных коэффициентов.

Цель исследования – дать оценку удельным потокам углерода от разложения валежа в кедрово-широколиственных лесах южной части Приморского края. Часть результатов в тезисной форме была опубликована ранее (Иванов и др., 2016б).

Объект исследования – кедрово-широколиственные леса на территории лесного участка Приморской государственной сельскохозяйственной академии (ПГСХА). Участок (28 тыс. га) характеризуется разнообразием условий местопроизрастания, наличием значительных площадей хвойно-широколиственных лесов, густой сетью рек и ручьев, перепадом высот 100 -500 м над уровнем моря. Восточная часть участка граничит с государственным Уссурийским заповедником им. В.Л. Комарова (протяжённость общей границы 32 км). По лесорастительному районированию Дальнего Востока лесной участок ПГСХА, расположенный на территории Уссурийского лесничества, находится на стыке Амуро-Уссурийского, Южно-Сихотэ-Алиньского и Хасан-Ханкайского лесорастительных округов. В возрастной структуре насаждений доминируют средневозрастные и приспевающие насаждения. Наиболее распространены высокополнотные древостои с полнотой 0,6-0,8. В целом леса характеризуются средней продуктивностью, доминируют насаждения IV класса бонитета.

Методы исследования

Классы разложения выделяли по методикам Р.Ф. Трейфельда (2001) и М.Е. Тарасова (2002): *первый класс* – сохраняются тонкие ветви, в древесине отсутствует гниль; *второй класс* – сохраняется кора, тонкие ветви утеряны, ствол может быть покрыт мхами и лишайниками; *третий класс* – кора сохраняется фрагментарно, остаются ветви лишь 1-2 порядков, возможно возникновение ядровых гилей; *четвертый класс* – кора почти полностью отсутствует, длина ветвей 1-го порядка меньше диаметра ствола; *пятый класс* – отсутствует структурная целостность, фрагмент валежа теряет первоначальную форму. Было выбрано по 3 фрагмента валежа на каждый класс разложения. Для измерений были выбраны три породы: сосна кедровая корейская (кедр) (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.), дуб монгольский (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.), ильм долинный (*Ulmus japonica* (Rehder), Sarg.). Интенсивность выделения CO_2 определялась камерным методом. Цилиндрические пластиковые основания диаметром 100 мм и высотой 250 мм вбивались в предварительно прорезанный во фрагменте валежа концентрический паз. Перед началом измерения основание герметично закрывали крышкой с воздуховодными шлангами. Изменение концентрации CO_2 в закрытом основании регистрировали с помощью портативного газоанализатора, смонтированного на биологиче-

ском факультете МГУ имени М.В. Ломоносова на базе инфракрасного сенсора AZ 7722 (AZ Instrument Corp.) и помпы E 134-11-120 (Hargraves Technologies Corp.). Время экспозиции крышки на основании составляло около 4 мин., первая из которых требовалась для обеспечения равномерности изменения концентраций по всей измерительной системе (основание, воздуховоды, прибор). Далее начинали отсчет времени, записывая показания прибора для отсчетов 0, 1, 2 и 3 мин. Сходимость изменений концентраций по отсчетам служила критерием корректности измерения. Во время измерения дыхания рядом с камерой измеряли температуру призменного слоя воздуха и температуру древесины на глубине 2, 5 и 10 см при помощи термометра Checktemp1 (Hanna Instruments). Для известных показателей скорости изменения концентрации CO_2, объема измерительной системы, площади основания камеры и температуры по уравнению Менделеева-Клапейрона рассчитывали эмиссию CO_2 с единицы площади (Карелин и др., 2014). Влажность фрагментов валежа определялась с помощью влагомера НН-2. Для этого в древесину на глубину 4,5 сантиметра вбивались электроды. Обработку результатов полевых измерений выполняли в MS Excel. Измерения проводились на протяжении сезонов 2015 и 2016 гг.

Результаты и выводы

Среднесезонные значения дыхания валежа по результатам измерений в 2015 и 2016 гг. представлены на рисунке 1.

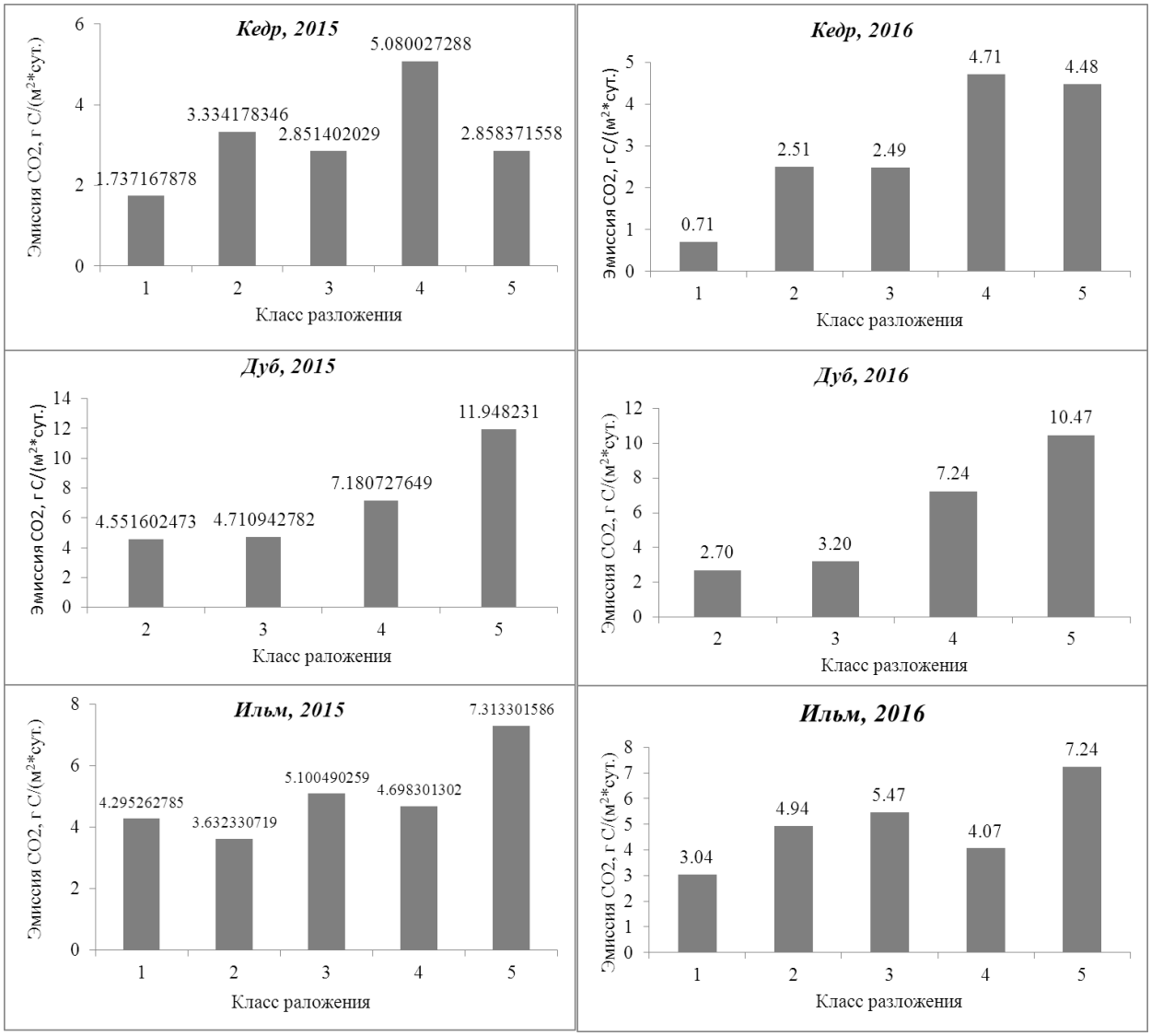


Рис. 1. Средние значения эмиссии углерода с поверхности валежа разных классов разложения за сезоны 2015 и 2016 гг.

Колебания эмиссии по датам измерений находились в пределах 0-20 г С/(м^2×сут.). При этом, анализируя диаграммы дыхания по трём породам, можно выявить общую тенденцию: по мере перехода фрагмента из 1-го класса в 5-й происходит увеличение эмиссии в несколько раз. Это связано с увеличением родов грибов-деструкторов и их массы. Важным фактором является площадь контакта валежа с почвой, которая минимальна в первых классах и увеличивается по мере разложения фрагментов. Известно также, что в древесине 5-го класса разложения увеличивается количество доступного азота, который поступает из почвы по гифам грибов.

Наименьший поток характерен для свежего валежа кедра, что, вероятно, связано с выделением живицы в местах установки оснований, которая препятствует диффузии молекул углекислого газа.

Характер изменчивости дыхания по классам одинаков в 2015 и 2016 гг., однако значения отличаются не значительно. Для сравнения средних значений дыхания по породам за два года измерений составлена гистограмма (рис. 2).

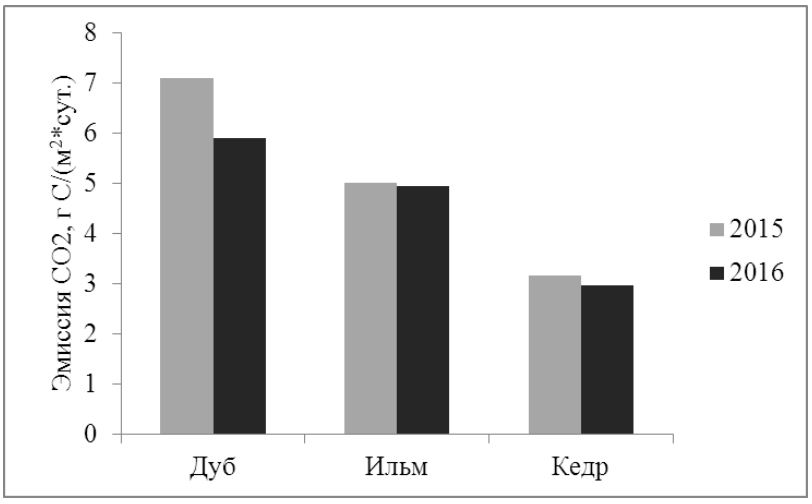


Рис. 2. Среднесезонные значения интенсивности дыхания валежа разных пород

В целом годичная изменчивость эмиссионных потоков углекислого газа с поверхности валежа не велика. В 2015 г. удельное дыхание валежа дуба было на 20.2 % больше, чем в 2016 г., соответственно ильма – на 1.1 %, кедра – на 6.4 %. Вероятно, это уменьшение связано с более длительными периодами без дождей в 2016 г. Древесина твердолиственных пород является значительно более сильным эмиттером двуокиси углерода, что объясняется большей их плотностью и, следовательно, большим содержанием углерода в единице объёма. Средние за два года значения эмиссии составили: дуб – 6.5 г С/(м^2×сут.), ильм – 5.0 г С/(м^2×сут.), кедр – 3.1 г С/(м^2×сут.). Таким образом, дыхание валежа ильма в 1.6 раза интенсивнее, чем кедра; а дуба, соответственно, в 2.1 раза.

Заключение. Нами выполнена оценка запасов валежа и содержания углерода в нем для кедрово-широколиственных лесов участка ПГСХА (Иванов и др., 2016а). При дальнейшей обработке полученных данных будет вычислена величина потока углерода от разложения валежа в пересчёте на 1 га насаждений разного возраста, что позволит более точно проводить расчёты общего экосистемного баланса углерода NEP (Net ecosystem production).

Библиографический список

1. Замолодчиков, Д.Г Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок / Д.Г. Замолодчиков // Лесоведение. – 2009. – № 4. – С. 3-15.

2. Иванов А.В. Запасы валежа в естественных насаждениях хвойно-широколиственных лесов южного Приморья / А.В. Иванов, О.Ю. Приходько, Р.В. Демченко // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2016а. – № 2. – С. 17-28.

3. Иванов А.В. Измерение потоков углерода от разложения валежа в южной части Приморского края / А.В. Иванов, Д.Г. Замолодчиков, С.Ю. Лошаков // Инновации и технологии в лесном хозяйстве ITF-2016: тезисы докладов V Международной научно-практической конференции. – 2016б. – С. 68.

4. Карелин, Д.В. Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO_2 из почв южнотаежного ельника на Валдае / Д.В. Карелин, А.В. Почикалов, Д.Г. Замолодчиков, М.Л. Гитарский // Лесоведение. – 2014. – № 4. – С. 56-66.

5. Курбанов Э.А. Бюджет углерода сосновых экосистем Волго-Вятского района. – Йошкар-Ола, 2002. – 300 с.

6. Курбанов Э.А. Древесный детрит в сосновых насаждениях Среднего Заволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Кранкина // Лесной журнал 2001. – № 4. – С. 27-32.

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

8. Курбанов, Э.А Пространственное распределение крупного древесного детрита в сосняках Марийского Заволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев // Экология, 2008. №2. –с. 103-109.

9. Мухин, В. . Микогенное разложение древесины и эмиссия углерода в лесных экосистемах / В.А. Мухин, П.Ю. Воронин // Экология. – 2007. – № 1. – С. 24-29.

10. Кудеяров, В.Н. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудеяров, Г.А. Заварзин, С.А. Благодатский и др. – М.: Наука. – 2007. – 315 с.

11. Сафонов, С.С. Эмиссия углерода от разложения валежа в южнотаёжном ельнике / С.С. Сафонов, Д.В. Карелин, В.А. Грабар // Лесоведение. – 2012. – № 5. – С. 44-49.

12. Сафонова, Т.И. Динамика видового состава грибов при сукцессиях на древесине осины в Южном Приуралье / Т.И. Сафонова // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. – Электронный научный журнал. – 2013. – № 4(8). – С. 34-37.

13. Тарасов, М.Е. Методические подходы к определению скорости разложения древесного детрита / М.Е. Тарасов // Лесоведение. – 2002. – № 5. – С. 32-38.

14. Трейфельд, Р.Ф. Определение запасов и фитомассы древесного детрита на основе данных лесоустройства / Р.Ф. Трейфельд, О.Н. Кранкина // Лесное хозяйство. – 2001. – № 4. – С. 23-26.

15. Швиденко, А.З Оценка запасов древесного детрита в лесах России / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепащенко, С. Нильссон // Лесная таксация и лесоустройство. – 2009. – Вып. 1(41). – С. 133-147.

16. Mukhortova, L.V. Carbon and nutrient release during decomposition of coarse woody debris in forest ecosystems of Central Siberia / L.V. Mukhortova // Folia Forestalia Polonica, Series A. – 2012. – Т. 54. – № 2. – С. 71 -83.

УДК 630*18

ВЛИЯНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА НА РАЗМЕЩЕНИЕ ЛЕСООБРАЗУЩИХ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ БУГУЛЬМИНСКО-БЕЛЕБЕЕВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ (В ПРЕДЕЛАХ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН)

И.Р.Рахматуллина[1], З.З. Рахматуллин[2], А.К.Габделхаков[2]
[1]Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы
[2]Башкирский государственный аграрный университет

На основе цифровой модели рельефа SRTM-3 в программном продукте SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) на территорию Бугульминско-Белебеевской возвышенности построены карты морфометрических показателей рельефа (гипсометрия, крутизна и экспозиция склонов). На них наложены схемы лесохозяйственного деления семи участковых лесничеств, и для каждого выдела рассчитаны вышеназванные показатели. В ходе их анализа выявлены закономерности размещения основных лесообразующих древесных пород по элементам рельефа. Исследуемый регион охватывает диапазон высот от 93 до 463 м, наименьшие отметки принадлежат северным районам, наибольшие – восточно-центральным. Влияние высотного фактора выражается в формировании определенного состава древесной растительности. В низинах (ниже 120 м) доминантой является ольха серая, субдоминантой – сосна, третье место у вяза, который встречается только на этой высоте. На высоте 120-175 м доминируют сосняки, при этом с увеличением высоты их средний запас уменьшается. Выше 175 м преобладающими породами попеременно являются липа, береза и осина. Большая часть возвышенности представлена слабонаклонными, плоскими и наклонными равнинами. Сильнопокатые и крутые склоны занимают меньше 2% территории. Какой-либо закономерности в распределении пород по крутизне склона не прослеживается. Большая часть лесонасаждений представлена на слабонаклонных равнинах крутизной 1-3°. Плоские равнины отданы под сельскохозяйственное освоение. На возвышенно-

сти наиболее распространены склоны северо-западных и восточных направлений. Древесная растительность располагается на всех склонах, минимально – на северных. Наиболее оптимальными по увлажнению и теплообеспеченности являются склоны западных, юго-восточных и юго-западных экспозиций.

***Ключевые слова**: лесообразующие породы, запас насаждений, морфометрические показатели рельефа, высота над уровнем моря, крутизна и экспозиция склона.*

INFLUENCE OF MORPHOMETRIC INDEXES OF THE RELIEF ON PLACEMENT OF WOOD VIEWS OF BUGULMA-BELEBEY UPLAND (WITHIN THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN)

I.R. Rakhmatullina[1], Z.Z. Rakhmatullin[2], A.K. Gabdelkhakov[2]
[1]Bashkir State Pedagogical University of M. Akmulla
[2]Bashkir State Agrarian University

The maps of the morphometric parameters of the relief (hypsometry, steepness and exposition of slopes) are created on the basis of the digital elevation model SRTM-3 in the software SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) on the territory of the Bugulma-Belebey upland. The scheme of the forestry division of the seven sub-districts are imposed on them, and the above indicators are calculated for each allotment. During the analysis the patterns of the distribution of the main forest-forming tree species for the landscape elements are revealed. The study region covers the altitude range of 93 to 463 m, the lowest level belongs to the Northern regions, the largest level belongs to the East-Central. The effect of a high-altitude factor is expressed in the formation of a certain composition of woody vegetation. In the lowlands (below 120 m) the alder is the dominant woody vegetation, the pine is a subdominant, and the third place belongs to the elm, which is only found at this altitude. The pine forests are dominate at the height of 120-175 m, at this with increase of height their average stock is decreasing. The lime-tree, birch and aspen are alternately predominant species at the height above 175 m . Most of the upland is presented by low-inclined, flat and sloping plains. Strongly sloping and steep slopes occupy less than 2% of the territory. There is no any regularity in the distribution of species on the steepness of slope. A large part of forests is presented on weakly sloping plains with steepness 1-3°. Flat plains are given for agricultural development. the slopes of the North-Western and Eastern directions are most common on thr upland. Woody vegetation is at all slopes, the minimum is at the slope of the North. The slopes of the Western, Southeastern and Southwestern expositionsare with the most optimal humidity and heat provision.

***Keywords**: forest forming species, stock of plantings, morphometric indexes of a relief, height above sea level, steepness and exposition of a slope.*

Введение. Рельеф земной поверхности является одним из главных факторов, предопределяющих биогеографическую, ландшафтную, почвенную, геохимическую дифференциацию территории. Воздействие рельефа на растительный покров и приуроченность лесных насаждений к определенным ландшафтным структурам являются общепризнанными и рассматриваются многими исследователями (Сочава, 1956; Щербаков, 1970; Янцер, 2005; Курбанов и др., 2015). При характеристике растительных сообществ отмечались их качественные и количественные отличия, связанные с влиянием рельефа через особенности почвенной среды, водного и температурного режимов. Но пространственные закономерности размещения лесных насаждений по элементам рельефа в основном носят описательный характер или касаются макрорельефа (Гулисашвили, 1956; Горчаковский, 1975; Курбанов и др., 2016). В последнее время появились количественные обоснования воздействия мезорельефа (Елсаков, Тетерюк, 2012; Погорелов, Шевела, 2013), но на территории исследуемого региона подобные

работы встречаются нечасто. С появлением цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий сопряженная оценка распределения лесонасаждений по элементам рельефа перешла на новую технологическую ступень.

Цель исследования – анализ влияния морфометрических характеристик рельефа на размещение лесных насаждений возвышенности.

Район исследований. Бугульминско-Белебеевская возвышенность – один из наиболее сельскохозяйственно- и промышленно развитых, густонаселенных и лесодефицитных районов, занимающий западную приподнятую окраину Республики Башкортостан. В результате усиленного освоения земель естественная растительность сохранилась лишь на крутосклонных и неудобных местах. Леса занимают меньше трети территории, при этом являются уникальными как с лесоводственной, так и с флористической точки зрения. Они неоднородны по составу, возрасту и запасам, выполняют множество различных экологических функций. Разным аспектам исследования этих лесных экосистем посвящено большое количество работ (Хайретдинов, 1987; Зайцев и др., 2007; Хамидуллина, Кулагин, 2013; Габделхаков и др., 2014).

Возвышенность включает часть Туймазинского лесничества (Бакалинский, Туймазинский, Шаранский административные районы, 15 участковых лесничеств), часть Альшеевского лесничества (Миякинский район, 3 участковых лесничества) и полностью Белебеевское лесничество (Белебеевский, Бижбулякский и Ермекеевский районы, 10 участковых лесничеств). Общая площадь лесного фонда 314,1 тыс. га, в т.ч. покрытая лесной растительностью – 290,2 тыс. га, из которой пятая часть отнесена к спелым и перестойным (Лесохозяйственные, 2015). В почвенном покрове преобладают черноземы выщелоченные и типичные, меньшую площадь занимают серые-лесные и почвы пойменного ряда (Хайретдинов, 1987).

Материалы и методы. Дня проведения экспериментальных работ была использована глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР), полученная в результате радиолокационной съемки Shuttle radar topographic mission (SRTM), с пространственным разрешением 3х3 угловые секунды, и находящаяся в свободном доступе в сети Интернет (http://srtm.csi.cgiar.org/).

Обработка ЦМР, преобразование географической системы координат в прямоугольную с помощью проекции UTM (зона 39, WGS-84), построение карт и расчет морфометрических характеристик рельефа осуществлялись в программном продукте SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses), распространяющимся под свободной лицензией (Conrad, 2015).

Для исследований лесонасаждений в целях репрезентативности были отобраны 7 участковых лесничеств (Бакалинское, Ермекеевское, Миякибашевское, Михайловское, Октябрьское, Присюньское, Усень-Ивановское), находящиеся в разных частях и высотных уровнях возвышенности по одному на каждый административный район региона.

Работа с данными лесоинвентаризации (векторные слои и атрибутивная база данных в виде таксационных описаний лесничеств по данным лесоустройства) проводилась в программном продукте QGIS, также распространяющимся бесплатно.

С помощью группы модулей Terrain Analysis SAGA GIS (Wilson, 2000) были получены в растровом представлении гипсометрическая карта, карты крутизны (углов наклона земной поверхности) и экспозиции склонов (рис. 1). На них были наложены векторные слои лесохозяйственного деления. Таким образом, в качестве операционной единицы выступили выдела, для каждого из которых были рассчитаны высота над уровнем моря, крутизна и экспозиция склона.

Количество обработанных лесных выделов составило 20478 штук. Их площадь достигает 78442 га, средняя площадь одного выдела 3,8 га. Используемая ЦМР с разрешением 95 м (0,9 га в пикселе) является приемлемой.

Обработка таксационных показателей лесных насаждений и выявление их взаимосвязей с

элементами рельефа производилось в MS Excel. Морфометрические показатели рельефа были объединены в группы и составили 12 классов по высоте местности с интервалом 27 м, 6 классов по величине крутизны склонов в соответствии с классификацией равнинных территорий (Жучкова, 2004) и 8 классов по экспозиции склонов, соответствующих сторонам света (интервал 45°).

Приуроченность лесных насаждений к морфометрическим характеристикам рельефа выявлялась по преобладающей породе на выделе и по анализу связи между его запасом и элементами рельефа.

Результаты и обсуждение. В результате анализа цифровой модели рельефа видно, что Бугульминско-Белебеевская возвышенность, охватывая диапазон высот от 92,9 до 462,6 м, не однородна. Наименьшие отметки принадлежат Бакалинскому району (средняя отметка 174,0 м), который находится на северных отрогах возвышенности. Наибольшие высоты у Белебеевского района (327,6 м), расположенного в восточно-центральной части и имеющего

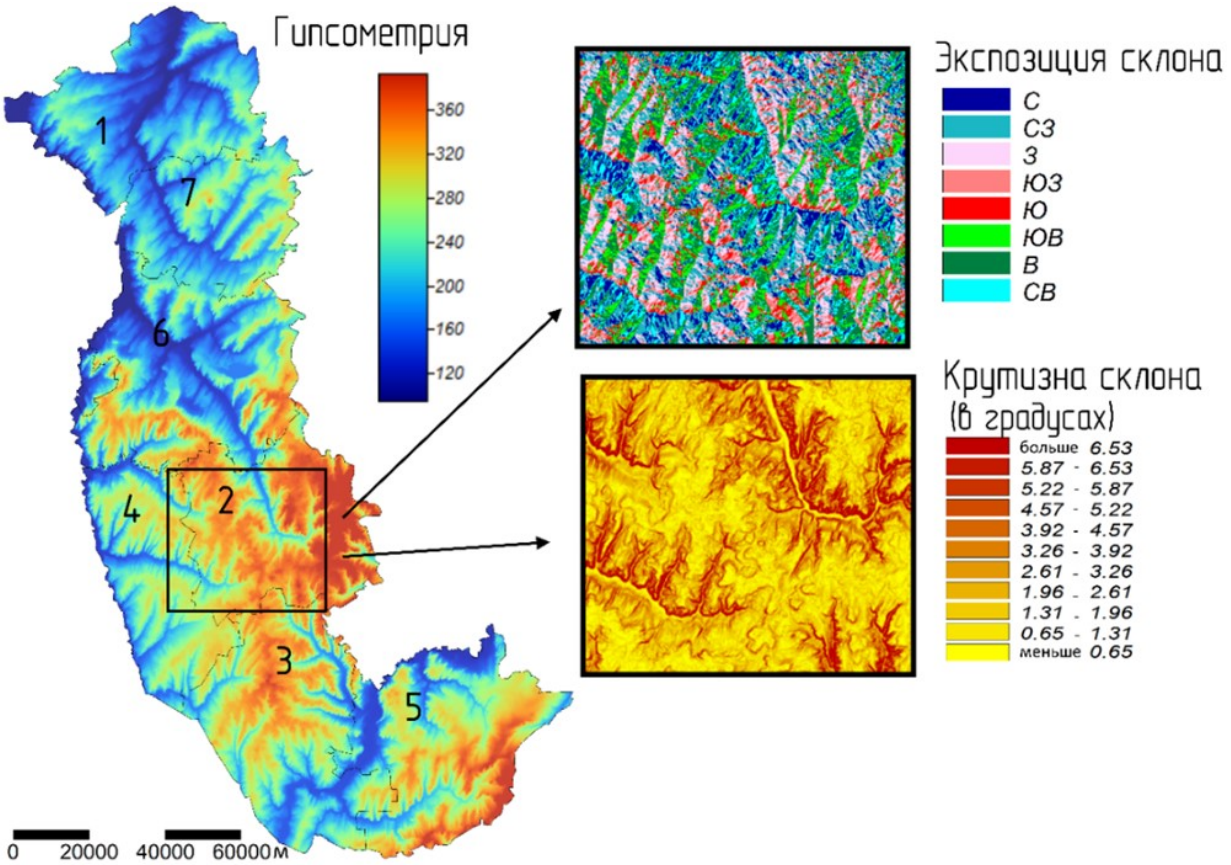


Рис. 1. Морфометрические показатели рельефа.
Цифрами обозначены административные районы: 1 – Бакалинский, 2 – Белебеевский, 3 – Бижбулякский, 4 – Ермекеевский, 5 – Миякинский, 6 - Туймазинский, 7 – Шаранский

Большая часть возвышенности по классификации равнинных территорий представлена слабонаклонными равнинами или очень пологими склонами (уклон от 1° до 3°) – 47,9% (табл. 1). Плоские равнины (уклон меньше 1°) занимают 25,5%, наклонные равнины (3-5°) – 15,2% рассмотренной территории. Площадь участков с уклоном, превышающим 10° составляет всего 2%, в основном это эродированные и обрывистые склоны берегов рек.

Различия в представленности склонов по экспозиции выражены в меньшей степени, наибольшая площадь склонов приходится на поверхности северо-западной (18,3%), наименьшая – южной и юго-западной экспозиций (по 7,6 %).

Таблица 1

Соотношение площадей (%) разных групп склонов

№ п/п	Уклон	Обозначение	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Всего
1	Меньше 1°	Плоские (субгоризонтальные)	4,0	3,6	3,3	2,7	2,3	2,4	3,2	4,0	**25,5**
2	1-3°	Слабонаклонные равнины (очень	7,0	5,7	7,9	5,9	2,9	2,7	6,3	9,5	**47,9**
3	3-5°	Пологие склоны	1,4	1,1	2,4	2,2	1,1	1,1	2,8	3,0	**15,2**
4	5-7°	Слабопокатые склоны	0,3	0,2	0,8	1,0	0,5	0,6	1,3	1,0	**5,7**
5	7-10°	Покатые склоны	0,1	0,1	0,5	0,7	0,5	0,5	0,8	0,5	**3,6**
6	10-20°	От сильнопокатых до крутых склонов	-	-	0,1	0,5	0,3	0,3	0,5	0,2	**2,0**
	Итого		**12,8**	**10,9**	**15,1**	**13,0**	**7,6**	**7,6**	**14,8**	**18,3**	**100,0**

Из выбранных участковых лесничеств наиболее высокие отметки местности наблюдаются в Усень-Ивановском (средняя отметка 379,5 м), наименьшие – в Бакалинском (168,1 м). Общая площадь отобранных лесничеств – 78,4 тыс. га, из них 72,1 тыс. га – покрытая лесной растительностью. Средняя отметка высот – 278,5 м над уровнем моря (табл. 2).

Таблица 2

Общая характеристика участковых лесничеств

Лесничества	Участковые лесничества	Средняя отметка высот, м	Общая площадь, га	В том числе лесопокрытая, га
Туймазинское	Бакалинское	168,1	13039	11942
	Октябрьское	270,7	10104	9271
	Присюньское	212,1	12489	11839
Белебеевское	Ермекеевское	262,8	9571	8524
	Михайловское	307,8	9577	8854
	Усень-Ивановское	379,5	13102	12000
Альшеевское	Миякибашевское	362,8	10560	9722
Итого		278,5	78442	7215

Лесообразователями выступают: сосна (*Pinus sylvestris* L.), ель (*Picea obovata* Ledeb.), лиственница (*Larix sukaczewii* Dyl., *L. sibirica* Ledeb.), дуб (*Quercus robur* L.), клен (*Acer platanoides* L., *A. tataricum* L., *A. negundo* L.), вяз (*Ulmus glabra* Huds., *U. laevis* Pall.), ясень (*Fraxinus excelsior* L.), береза (*Betula pendula* Roth, *B. pubescens* Ehrh.), липа (*Tilia cordata* Mill.), осина (*Populus tremula* L.), тополь (*Populus alba* L., *P. nigra* L.), ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moench), ольха черная (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), различные виды ив (*Salix alba* L., *S.fragilis* L.).

При группировке высот на 12 интервалов, лесопокрытая территория распределяется следующим образом. Наименьшая площадь приходится на 2 высотный уровень (121,6-148,6 м) – около 2 тыс. га, наибольшая – на 9-й (310,7 – 337,7 м) – около 8 тыс. га (табл. 3).

Наиболее продуктивными в пересчете на единицу площади являются 3-й и 2-й высотные интервалы – 173 и 172$м^3га^{-1}$, но ввиду их малой представленности наиболее продуктивным можно считать 4-й высотный уровень, обладающий сравнительно большей площадью, общим и средним запасом. Наименее продуктивным является 1-й высотный уровень, территория ниже 121,6 м, со средним запасом – 124 $м^3$/га (рис. 2) .

Таблица 3

Высотное распределение доминантных и субдоминантных пород

№ п/п	Высотный уровень	Лесопокрытая площадь, га	Общий запас, тыс. м^3	Доминант			Субдоминант		
				порода	% от запаса	% от площади	порода	% от запаса	% от площади
1	121,63 и ниже	2604	324	ольха с.	40	47	сосна	20	12
2	121,64- 148,64	1958	336	сосна	53	38	дуб	12	11
3	148,65 - 175,64	3269	566	сосна	46	36	липа	23	18
4	175,65 - 202,65	7074	1059	липа	29	20	осина	25	25
5	202,66 - 229,66	7720	1051	липа	42	29	осина	22	26
6	229,67 - 256,67	7148	943	липа	33	24	береза	27	25
7	256,68 - 283,67	6609	894	береза	39	35	липа	30	24
8	283,68 - 310,68	7751	1059	липа	31	23	береза	29	29
9	310,69 - 337,69	7873	1034	липа	32	29	береза	29	31
10	337,70 - 364,70	6596	835	береза	35	36	липа	27	23
11	364,71 -391,69	6672	891	береза	32	30	осина	28	31
12	391,7 и выше	6878	987	осина	53	40	береза	20	25
	Итого	**72152**	9979	**липа**	**28**	**22**	**береза**	**25**	**27**

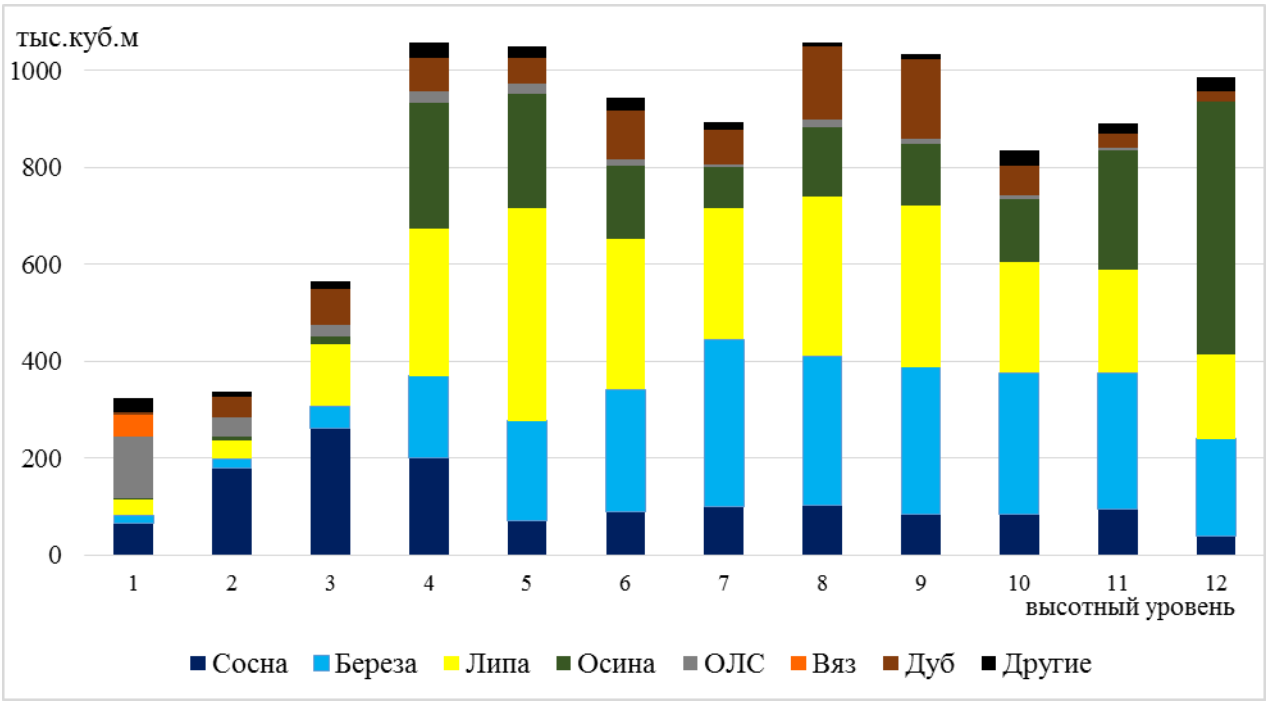


Рис. 2. Представленность лесных насаждений по высотным уровням

При значительном разнообразии пород, являющихся доминантными на определенных высотных уровнях, по общему запасу преобладают липняки, им принадлежит 28% общего запаса, хотя по занимаемой территории первенство принадлежит березнякам с 27% лесопокрытой площади. В большинстве случаев чистые липовые насаждения встречаются редко, обычно в составе присутствуют дуб, клен, вяз.

Вдоль русел рек и ручьев к низинам приурочена ольха серая, занимающая 47% лесопокрытой площади первого высотного интервала. Здесь же произрастает сосна, ее площади невелики (12%), но за счет большего запаса (20%) является субдоминантой. Третье место по

запасу (13%) и второе по площади (14%) принадлежит вязу. Причем вяз встречается только на этом высотном уровне, чем и объясняется высокая обратная коррелируемость между его запасами и высотой поверхности (коэффициент корреляции = – 1,0).

На втором и третьем высотном уровне (121,6-175,6) доминирует сосна, 64% ее площади – это смешанные насаждения. В этих условиях ее средний запас 230,5 $м^3га^{-1}$. Сосна выше 5-го высотного интервала встречается относительно редко (рис. 2), с более высокой (46%) долей чистых культур и с наименьшим средним запасом – 122 $м^3/га$. Произрастает сосна преимущественно в снытьевом типе леса. Другие типы (злаковый, широкотравный, крапивно-таволговый) занимают менее 10%.

Выше четвертого высотного уровня (175,6 м) преобладают мягколиственные насаждения. Липа, береза, осина попеременно являются доминантными либо субдоминантными породами. Наибольший общий запас липы наблюдается на 5-м, березы – на 7-м, а осины – на 12-м высотном интервале.

Береза и осина по сравнению с остальными породами имеют высокий положительный коэффициент корреляции между запасами и высотой территории (0,8 и 0,7 соответственно). Это объясняется широкой приспособляемостью и быстрым ростом данных видов, что позволяет им завоевывать пространство в тех условиях, где для хвойных и широколиственных пород складываются неблагоприятные условия.

Насаждения дуба не имеют ярко выраженной приуроченности к высоте и встречаются на всех высотных интервалах, кроме низменностей. Поэтому и коэффициент корреляции между его запасами и высотой имеет низкое значение (-0,2).

Размещение лесонасаждений по крутизне склона укладывается в общую тенденцию распределения территории (табл. 1). Большая часть насаждений представлена на слабонаклонных равнинах крутизной 1-3°, т.к. территория с таким уклоном занимает половину территории возвышенности. Однако если плоские равнины занимают четверть площади возвышенности, то лесных площадей среди них - незначительная часть (рис. 3), что объясняется большим сельскохозяйственным освоением равнинных территорий.

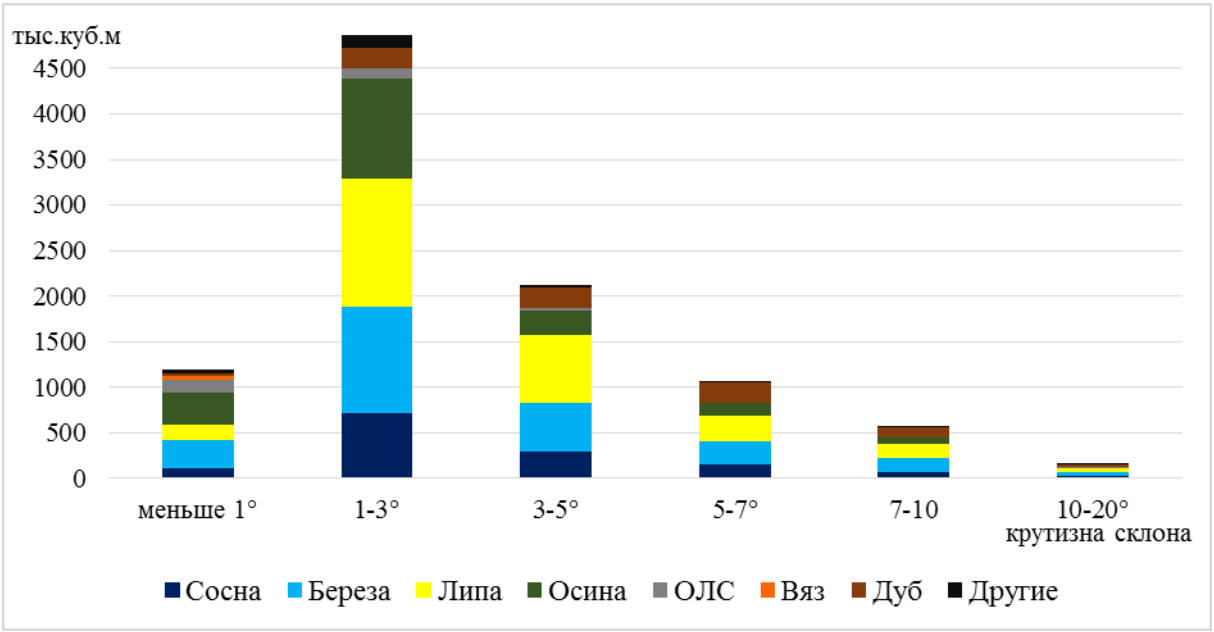


Рис. 3. Представленность лесных насаждений по крутизне склона

Какой-либо закономерности в распределении пород по крутизне склона не прослеживается. Запасы пород примерно пропорциональны территориям. Коэффициенты корреляции между запасами пород и крутизной склона свидетельствуют об обратной связи между ними, наиболее тесная – у ольхи серой и вяза (по -0,9), отсутствует связь у дуба (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между показателями рельефа и запасами пород

Показатели рельефа/ лесные породы	Сосна	Береза	Липа	Осина	ОЛС	Вяз	Дуб	Другие
Высота местности	-0,5	0,8	0,4	0,7	-0,7	-1,0	0,2	0,0
Крутизна склона	-0,5	-0,6	-0,5	-0,7	-0,9	-0,9	-0,2	-0,7
Экспозиция склона	0,8	0,8	0,7	0,7	0,5	0,4	0,7	0,8

Распределение насаждений по азимутам показало, что древостои располагаются на всех склонах, кроме северных. Минимальны запасы также на северо-восточных экспозициях (рис. 4). Хотя при общей оценке территории эти склоны занимают больше территории (13 и 11%), чем южные и юго-западные (по 8%).

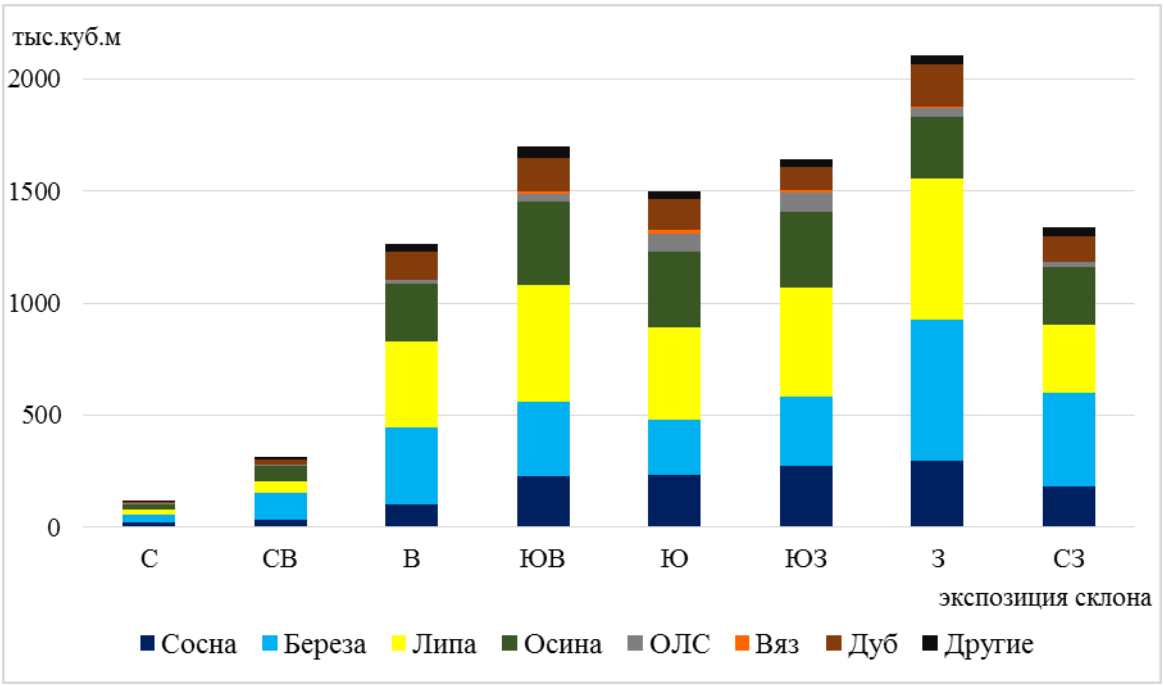


Рис. 4. Представленность лесных насаждений по экспозиции склона

Наиболее продуктивными являются западные, юго-восточные и юго-западные склоны, что объясняется более оптимальными условиями для роста древостоев: более теплыми, чем северные и северо-восточные; более увлажненными, чем южные направления. В целом коэффициенты корреляции между запасом насаждений и экспозицией склона свидетельствуют о высокой связи между ними (0,7-0,8). Только запасы ольхи серой и вяза имеют коэффициенты 0,5 и 0,4, что объясняется большей зависимостью этих пород от высоты и уклона местности.

Выводы. По данным глобальной цифровой модели рельефа SRTM построены карты, отражающие основные свойства рельефа (гипсометрия, крутизна и экспозиция склонов), на базе которых раскрыты закономерности размещения основных лесообразующих древесных пород по элементам рельефа и раскрыт вклад основных морфометрических характеристик поверхности в территориальную организацию лесных насаждений Бугульминско-Белебеевской возвышенности.

Влияние высотного фактора выражается в формировании определенного состава древесной растительности. К низинам (ниже 120 м) приурочены ольха серая, вяз. На высотном интервале 120-175 м доминируют сосняки. Выше 175 м преобладающими породами попеременно являются липа, береза и осина. Лесообразующие породы характеризуются предрасположенностью к склонам с крутизной 1-3° и к западным, юго-восточным и юго-западным склонам. Помимо рельефа на закономерности размещения лесных насаждений влияет целый ком-

плекс факторов внешней среды, сопряженный анализ которых должен стать предметом дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Габделхаков, А.К Фитомасса и формирование липняков лесостепной зоны Республики Башкортостан: монография / А.К. Габделхаков, З.З. Рахматуллин, Ф.Ф. Рамазанов, И.Р. Рахматуллина. – Уфа: Мир печати, 2014. – 156 с.
2. Горчаковский, П.Л. Растительный мир высокогорного Урала / П.Л. Горчаковский. – М.: Наука, 1975. – 283 с.
3. Гулисашвили, В.З. Горное лесоводство / В.З. Гулисашвили. – М.: Наука, 1956. – 354 с.
4. Елсаков, В.В. Роль рельефа в формировании растительности карстовых ландшафтов европейского северо -востока России / В.В. Елсаков, Л.В. Тетерюк // Исследование Земли из космоса. – 2012. – №3. – С.78-93.
5. Жучкова, В.К. Методы комплексных физико-географических исследований: учебное пособие / В.К. Жучкова, Э.М. Раковская. – М.: Академия, 2004. – 368 с.
6. Зайцев, Г.А. Формирование ассимиляционного аппарата лиственницы Сукачева (*Larix Sukaczewii* Dyl.) на инсолируемых крутосклонах Бугульминско-Белебеевской возвышенности / Г.А. Зайцев, А.А. Кулагин, Н.Г. Кужлева // Устойчивость растений к неблагоприятным факторам внешней среды : материалы Всероссийской научной конференции. – Иркутск, 2007. – С.97-99.
7. 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. – № 1 (13). – С. 36-48.
8. 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.
9. Лесохозяйственные регламенты Альшеевского, Белебеевского и Туймазинского лесничеств Республики Башкортостан (с внесенными изменениями на 01.01.2015 г). – Уфа, 2015.
10. Погорелов, А.В Высота местности как фактор структуры лесной растительности / А.В. Погорелов, С.Ю. Шевела // Геология, география, глобальная энергия: НТЖ. – 2013. – №1(48). – С. 190-200.
11. Сочава, В.Б. Закономерности географии растительного покрова горных тундр СССР / В.Б. Сочава. – М.-Л.: Наука, 1956. – 397 с.
12. Хайретдинов, А.Ф Белебеевская возвышенность / А.Ф. Хайретдинов. – Уфа: Башкнигоиздат, 1987. – 158 с.
13. Хамидуллина, Г.Г Биоэкологическая оценка искусственных сосняков Бугульминско-Белееевской возвышенности на территории Республики Башкортостан / Г.Г. Хамидуллина, А.Ю. Кулагин // Охрана природной среды и эколого-биологическое образование: III Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция. – Елабуга, 2013. – С. 287-288.
14. Щербаков, Ю.А. Поступление и отражение прямой солнечной радиации на неодинаково ориентированных склонах в разных условиях / Ю.А. Щербаков // Влияние экспозиции на ландшафты. – М.: Наука, 1970. – С.100-133.
15. Янцер, О.В Весенние различия в развитии растительности на склонах различной солярной экспозиции / О.В. Янцер // Успехи современного естествознания. – 2005. – №1. – С.77-80.
16. CGIAR-CSI SRTM 90m DEM Digital Elevation Database [Электронный ресурс]. – URL: http:// srtm.csi.cgiar.org/ (дата обращения 28.09.2016).
17. Conrad, O. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 [Электронный ресурс] / O. Conrad, B. Bechtel, M. Bock, H. Dietrich, E. Fischer, L. Gerlitz, J. Wehberg, V. Wichmann, J. Böhner // Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015., 2015. – URL: http://www.geosci-model-dev.net/8/1991/2015/gmd-8-1991 -2015.html (дата обращения 28.09.2016)
18. Wilson, J.P. Terrain Analysis: Principles and Applications / J.P. Wilson, J.C. Gallant. (Eds). – Wiley, 2000. – 479 p.

УДК 630*8

АЭРОФОТОСЪЕМКА УЧАСТКОВ ЛЕСНОГО ФОНДА ЛИСИНСКОГО УЧЕБНО-ОПЫТНОГО ЛЕСХОЗА БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

А.А. Никифоров
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет

В статье представлена методика проведения работ по аэрофотосъемке участков лесного фонда и обработке полученных материалов. Для аэрофотосъемки участков лесного фонда применялся многороторный беспилотный летательный аппарат. В результате аэрофотосъемки получена серия снимков высокого разрешения лесного участка Лисинского учебно-

опытного лесхоза. Обработка материалов аэрофотосъемки выполнена в цифровой фотограмметрической системе PhotoScan. После обработки получены карта высот и ортофотоплан высокого разрешения. Полученные материалы могут применяться для определения лесотаксационных характеристик.

Ключевые слова: *аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат, ортофотоплан*

AERIAL PHOTOGRAPHY OF FOREST FUND OF LISINO FES BY UNMANNED AERIAL VEHICLE

A.A. Nikiforov
Saint Petersburg State Forest Technical University

The paper presents a methodology of work on aerial forest areas and processing the submissions received. For aerial survey of forest areas multirotor unmanned aerial vehicle was used. As a result, we obtained a series of aerial high resolution images of forest fund of Lisino FES. Processing of aerial photographs made in the digital photogrammetric system PhotoScan. Digital elevation map and high-resolution orthophoto were obtained after the processing. The resulting materials may be used to determine characteristics of forest taxation.

Keywords: *aerial photography, unmanned aerial vehicle, orthophotoplan*

Введение. Для изучения лесного растительного покрова широко применяются дистанционные методы. Они основаны на получении информации об исследуемых объектах на расстоянии путем регистрации электромагнитных излучений при помощи чувствительных приемников, установленных на космических кораблях, самолетах, вертолетах, беспилотных летательных аппаратах (Сухих, 2005). Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) представляет собой разновидность радиоуправляемого летательного аппарата, управление которым осуществляется оператором с земли или в автоматическом режиме (на автопилоте) (Зинченко, 2011).

Наиболее распространенными беспилотными летательными аппаратами являются БПЛА самолетного и вертолетного типа. У каждого типа есть свои преимущества и недостатки. БПЛА самолетного типа способны выполнять полет длительное время. Для взлета и посадки необходимо открытое пространство, либо требуются дополнительные механизмы – катапульта, парашют. БПЛА вертолетного типа, наоборот, для взлета и посадки не требуется много места, но продолжительность полета в разы меньше. Согласно классификации, многороторные платформы относятся к беспилотным летательным аппаратам вертолетного типа (табл. 1) (Зинченко, 2011).

Таблица 1

Типы беспилотных летательных аппаратов

По типу используемого двигателя \ по техническому способу выполнения полёта	Аэростатические	Аэродинамические			Реактивные
		Гибкое крыло	Фиксированное крыло	Вращающееся крыло	
Безмоторные	Аэростаты	Воздушные змеи и аналоги безмоторных аппаратов сверхлегкой авиации	Планеры	-	-
Моторные	Дирижабли	Аналоги моторных аппаратов сверхлегкой авиации (парапланы, дельтапланы и др.)	БПЛА самолетного типа	БПЛА вертолетного типа	Космические реактивные аппараты

Следует отметить ряд российских компаний, занимающихся производством комплексов на основе многороторных платформ. ООО «Специальный технологический центр» (СТЦ) является разработчиком мультикоптеров с четырьмя и шестью роторами (Специальный .., 2016). Квадрокоптер имеет стартовую массу 2,5 кг, гексакоптер - 4,5 кг. В состав целевой нагрузки БПЛА входят несколько вариантов фотоаппаратов, тепловизоров и видеокамер.

Беспилотный комплекс Геоскан 401 позиционируется как решение для получения детальных 3D-моделей и оценки состояния объектов, непосредственного визуального наблюдения за местностью (Геоскан, 2016). В комплексе используется летательный аппарат мультикоптерного типа с четырьмя роторами, что обеспечивает возможность длительного наблюдения из заданной точки. Комплектуется полнокадровым фотоаппаратом с центральным затвором с высоким разрешением матрицы.

Ижевская компания ZALA AERO производит беспилотные аппараты вертолетного типа с шестью (421-21) и восьмью (421-22) роторами. Производителем позиционируются как аппараты малой и средней дальности с системой автоматического управления. Применяются в местах, где отсутствуют условия для взлета и посадки беспилотных летательных аппаратов самолетного типа (ZALA…, 2016).

Рассмотренные беспилотные летательные аппараты находят применение в различных отраслях деятельности, не исключением является изучение земной поверхности, в том числе и лесов (Голубева, Жаринов, 2014; Представители …, 2005; Трубников, Воронов, 2016; Трубников, 2016; Щербаков, 2016].

Цель работы – изучить возможность применения многороторного беспилотного летательного аппарата для проведения аэрофотосъемки участков лесного фонда.

Объекты и методика исследований. Исследования выполнены на примере Лисинского учебно-опытного лесхоза (Лисинского УОЛХ). Учебно-опытный лесхоз располагается в Ленинградской области в центральной части Тосненского административного района. Территория лесхоза представляет собой компактный лесной массив, протяженность с севера на юг составляет 34 км, с запада на восток - 18 км. По материалам лесоустройства, которое проводилось в 2005 г., общая площадь составляет 28384 га.

Комплектация применяемой для аэрофотосъемки многороторной платформы следующая: рама Tarot FY650 с размером по диагонали 650 мм; моторы T-Motor MN4010 с частотой вращения 475 об./вольт; пропеллеры прямого и обратного вращения из карбона размером 15x5.5”, контроллеры управления скоростью вращения моторов T-Motor с опторазвязкой по каналу управления и номинальной нагрузкой 40А; автопилот Pixhawk с прошивкой Arducopter v3.1.5; система глобального позиционирования GPS Ublox Neo-6m; система передачи данных по радиоканалу 900МГц; литий-полимерные аккумуляторные батареи емкостью 5000 мАч 4s1p с номинальной токотдачей 40C; подвес на бесколлекторных моторах прямого привода Tarot T-2D; фотовидеокамера GoPro Hero 3 Black Edition (рис. 1).

Рис. 1. Многороторная платформа

Автопилот Pixhawk разработан американской компанией 3DRobotics. Он оснащен 32-битным микропроцессором STM32F427 Cortex M4 и 32-битным сопроцессором STM32F103, которые обеспечивают необходимую производительность.

Двухосевой подвес Tarot T-2D на бесколлекторных моторах прямого привода предназначен для стабилизации положения фотовидеокамеры во время съемки (рис. 2).

Рис. 2. Двухосевой подвес на бесколлекторных моторах прямого привода

В состав наземной станции входят портативный компьютер с установленным программным обеспечением Mission Planner и радиомодем для обеспечения связи с беспилотным летательным аппаратом. Программное обеспечение позволяет выполнять настройку БПЛА, создавать полетное задание, управлять летательным аппаратом и получать данные телеметрии во время полета. План полета представлен в табличном виде (табл. 2).

Предварительно были определены опорные точки для географической привязки планово-картографических материалов. Для визуализации опорных точек на снимках применялись листы фанеры, окрашенные в белый цвет, размером 0,5х0,5м, которые укладывались на открытые участки местности. Измерения координат производились с помощью GPS-приемника по центру листа фанеры, результаты приведены в таблице 3.

Таблица 2

План полетного задания

№	Наименование команды	Широта, град.	Долгота, град.	Относительная	Дистанция, м	Азимут,
1	TAKEOF	0	0	30	0	0
2	WAYPOINT	59.4092187	30.7002851	150	51.4	35
3	WAYPOINT	59.4151479	30.6970074	150	684.9	344
4	WAYPOINT	59.4148428	30.6953723	150	98.5	250
5	WAYPOINT	59.4092417	30.6984691	150	647.0	164
6	WAYPOINT	59.4092647	30.6966530	150	102.8	271
7	WAYPOINT	59.4145378	30.6937373	150	609.1	344
8	WAYPOINT	59.4142328	30.6921023	150	98.5	250
9	WAYPOINT	59.4092876	30.6948369	150	571.2	164
10	RETURN TO LAUNCH	0	0	0	0	0

Таблица 3

Географические координаты опорных точек

№ опорной точки	Долгота, град.	Широта, град.	Высота, м
1	30.69730	59.40922	54
2	30.69470	59.41065	56
3	30.69451	59.41249	57
4	30.69331	59.41438	56
5	30.69492	59.41487	56
6	30.69647	59.41507	56

Запуск, полет и посадка многороторной платформы выполняются полностью в автоматическом режиме. Оператор беспилотного летательного аппарата осуществляет контроль за

выполнением команд, а в случае возникновения нештатной ситуации переводит управление БПЛА в ручной режим.

Беспилотным летательным аппаратом выполнена аэрофотосъемка 123 квартала Лисинского учебно-опытного лесхоза, в результате получена серия аэрофотоснимков высокого разрешения (рис. 3).

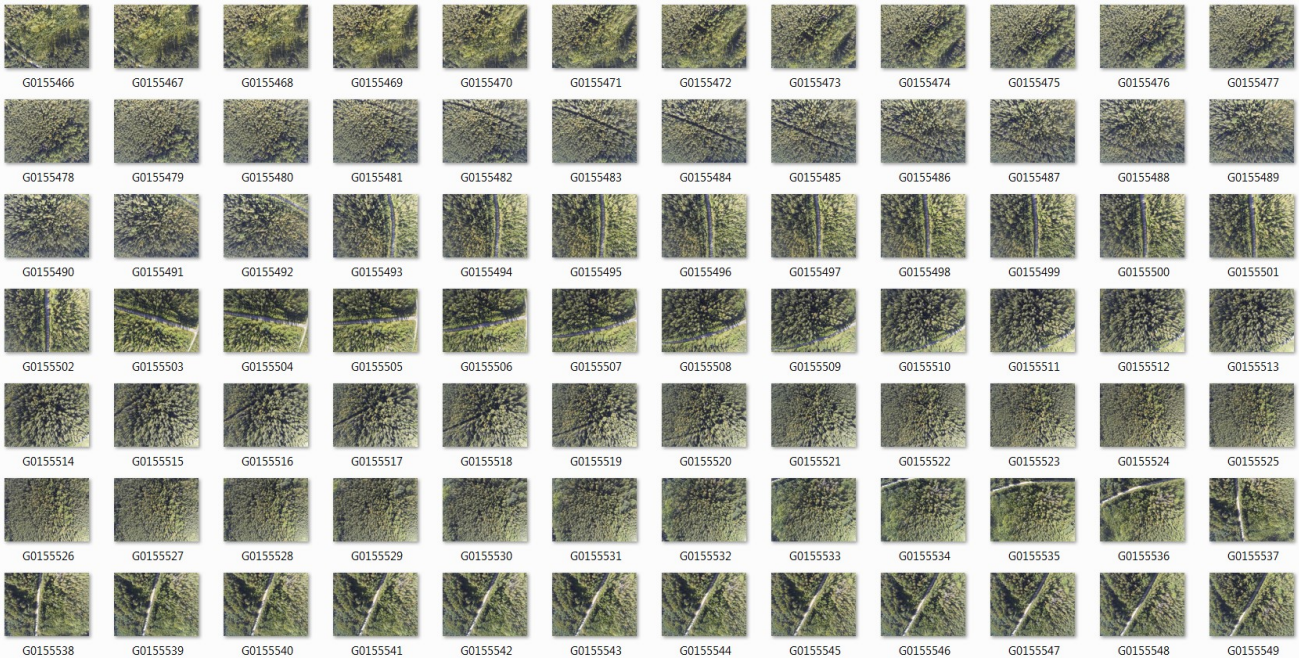


Рис. 3. Серия аэрофотоснимков высокого разрешения на примере Лисинского учебно-опытного лесхоза

Обработка материалов аэрофотосъемки выполнена в специализированной цифровой фотограмметрической системе Agisoft Photoscan (Руководство …, 2016). Серия состоит из 166 изображений с разрешением каждого снимка 3000 х 2250 пикселей, пространственное разрешение съёмки составило 7,13 см/пикс.

Для определения местоположения камеры во время съемки проведен анализ лог-файлов полета. С помощью программы «Трек-Альбом: Летная Книжка» http://track-album.com сопоставлены координаты с центрами снимков. Координаты добавлены в свойства изображений в специальном формате EXIF. EXIF (англ. Exchangeable Image File Format) — стандарт, позволяющий добавлять к изображениям дополнительную информацию (метаданные), комментирующую этот файл, описывающую условия и способы его получения.

Для задания положения и ориентации модели необходимо указать географические координаты минимум для трёх точек. Важно как можно точнее определить положение опорных точек через их проекции на исходных фотографиях. Для определения положения маркеров в трехмерном пространстве необходимо указать их положение как минимум на двух фотографиях. Чем большее число фотографий используется для указания проекций маркера, тем выше будет точность позиционирования. По результатам обработки получена таблица среднеквадратичных ошибок отклонения положения маркера относительно опорной точки (табл. 4).

Во время процесса выравнивания фотографий фотограмметрическая система PhotoScan оценивает значения параметров внутренней и внешней ориентации камеры, в том числе нелинейных радиальных дисторсий (Никифоров, 2011).

Фотограмметрическая система PhotoScan поддерживает наиболее распространенные типы камер: кадровые камеры, сферические камеры, цилиндрические камеры и камеры с широкоугольным объективом. Для каждого типа камер используется своя модель корректировки дисторсий (рис. 4).

Таблица 4

Вычисленные среднеквадратичные ошибки положения маркеров относительно опорных точек

№ опорной точки	Ошибка X, м	Ошибка Y, м
1	6.96789	0.0381546
2	0.705149	3.16084
3	-5.43435	-2.43173
4	0.517607	2.57847
5	-1.96702	-3.13761
6	-2.07492	2.80636
Общая	3.80839	2.59083

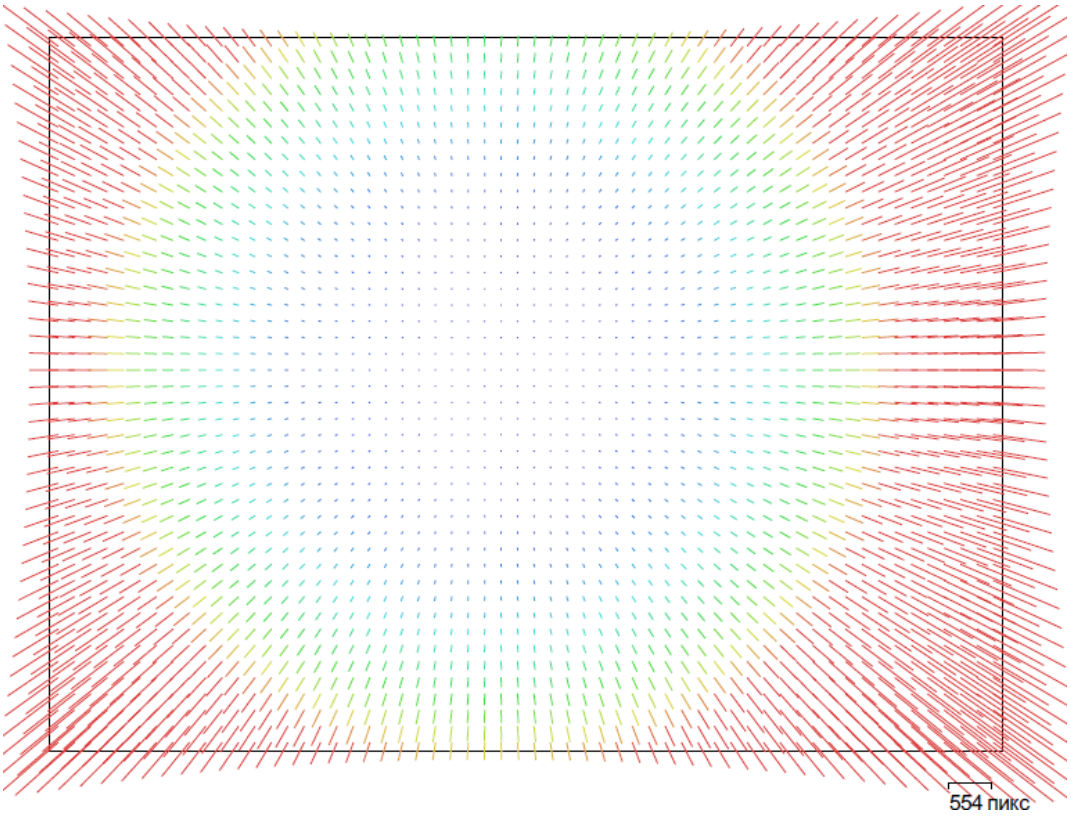


Рис. 4. Невязка по связующим точкам

По умолчанию PhotoScan рассматривает стандартные для камеры параметры калибровки в качестве первоначального предположения и пересчитывает их во время выравнивания фотографий (табл. 5).

Используются следующие параметры калибровки камеры:

fx, fy - фокусное расстояние по x- и y- осям (в пикселях);

cx, cy - координаты главной точки, т. е. координаты пересечения оптической оси объектива с плоскостью сенсора;

Skew - коэффициент скоса;

k1, k2, k3 - коэффициенты радиальной дисторсии;

p1, p2 - коэффициенты тангенциальной дисторсии.

Таблица 5

Параметры калибровки камеры

Тип камеры	Fx	Fy	Cx	Cy	Skew	K1	K2	K3	P1	P2
Кадровая	1780.5	1781.28	1392.9	1040.81	-1.1047	-0.02874	0.091423	-0.02611	0.001257	-0.00043

После определения положения и ориентации камеры для каждого кадра и создается разреженное облако точек. В результате обработки выполнено выравнивание серии из 166 снимков и построено разреженное облако из 157708 точек.

ЦФС PhotoScan позволяет создавать и отображать плотное облако точек. Основываясь на рассчитанных положениях камер, программа вычисляет карты глубины для каждой камеры и на их основе строит плотное облако точек. Плотное облако состоит из 16943810 точек.

PhotoScan поддерживает несколько методов восстановления трехмерной полигональной модели и предоставляет ряд настроек, позволяющих выполнить оптимальную реконструкцию для конкретного набора фотографий.

Методы, определяемые типом поверхности «карта высот», оптимизированы для моделирования плоских поверхностей, например, таких как ландшафт. Этот тип поверхности следует выбирать при обработке результатов аэрофотосъемки, поскольку соответствующие методы требуют меньшего количества ресурсов памяти и, следовательно, позволяют обрабатывать большее число изображений. На основе плотного облака точек создана модель, которая содержит 713000 полигонов и 358314 вершин.

Режим наложения текстуры определяет, каким образом текстура объекта будет храниться в текстурном атласе. Выбор подходящего режима помогает получить оптимальный вид хранения текстуры, что ведет к улучшению качества визуализации итоговой модели. Для визуализации использовался общий режим параметризации с размером текстуры 4096 x 4096 пикс.

Результаты и их обсуждение. Карта высот (DEM) представляет модели поверхности в виде регулярной сетки значений высоты. Карта высот может быть рассчитана на основании плотного облака точек, разреженного облака точек или полигональной сетки. Чтобы добиться наиболее точного результата, карта высот создана на основе плотного облака точек с разрешением 4726 x 4910 пикс (рис. 5).

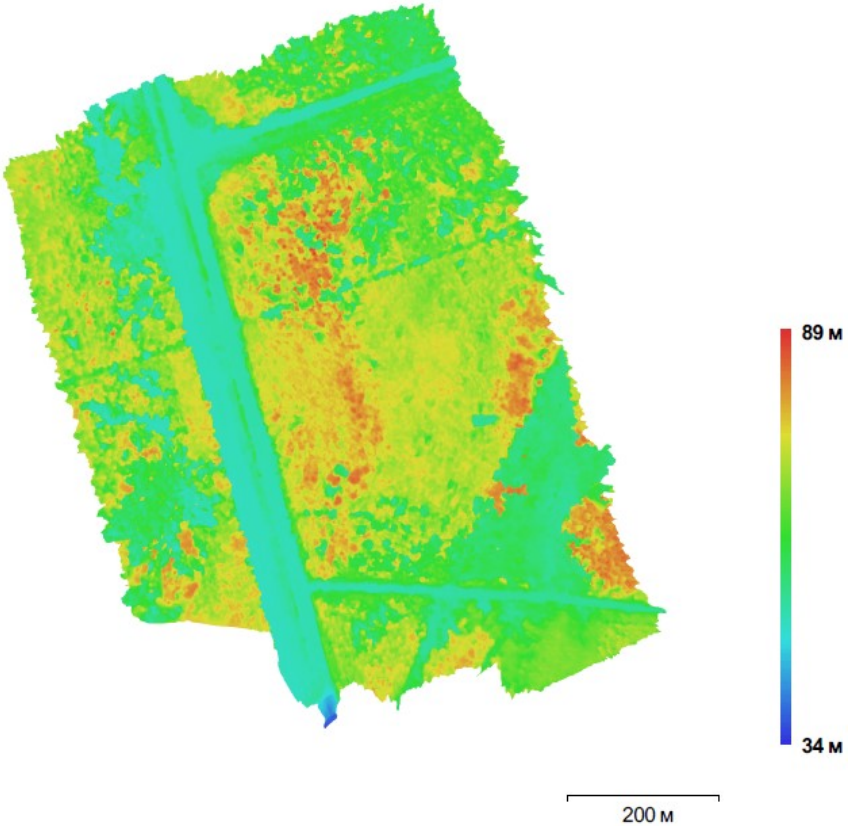


Рис. 5. Карта высот (DEM)

Ортофотоплан строится на основе данных исходных снимков и реконструированной модели, что позволяет создавать результирующее изображение высокого разрешения. Ортофотоплан создан с разрешением 12188 x 13076 пикс. (рис. 6).

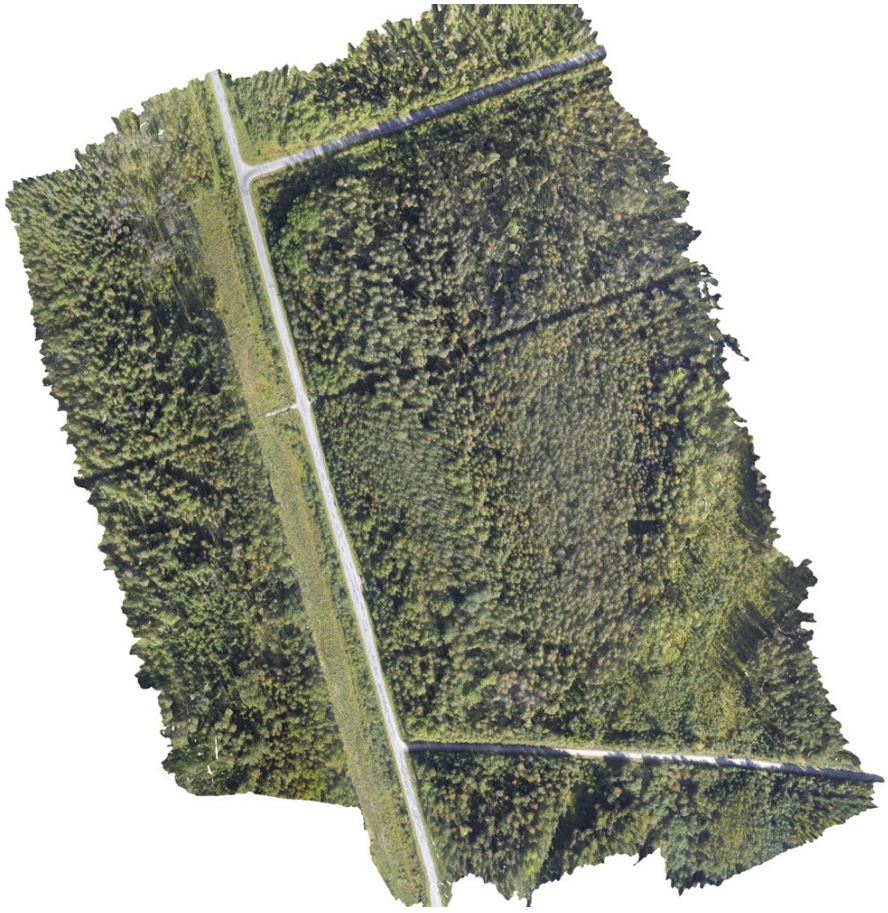


Рис. 6. Ортофотоплан лесного участка 123 квартала Лисинского учебно-опытного лесхоза

Полученный ортофотоплан соответствует требованиям лесоустроительной инструкции (Лесоустроительная …, 2011). На основе ортофотоплана и карты высот можно выполнить автоматизированное дешифрирование с целью определения границ лесотаксационных выделов и их таксационных характеристик.

Заключение. В результате проведенных работ выполнена апробация возможности применения беспилотного летательного аппарата на базе многороторной платформы для аэрофотосъемки участков лесного фонда. Беспилотные летательные аппараты вертолетного типа на основе многороторных платформ занимают свою нишу при выполнении работ, связанных с аэрофотосъемкой. Обладая возможностью вертикального взлета и приземления, они в основном применяются для аэрофотосъемки небольших участков. Для маршрутной аэрофотосъемки значительной протяженности рекомендуется применять БПЛА самолетного типа.

В Лисинском учебно-опытном лесхозе – филиале Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета проведена аэрофотосъемка многороторным беспилотным летательным аппаратом 123 квартала и получена серия из 166 снимков высокого разрешения 3000 x 2250 пикс. Пространственное разрешение съёмки составило 7,13 см/пикс.

Полученные материалы аэрофотосъемки обработаны в цифровой фотограмметрической системе Agisoft Photoscan. Выполнено выравнивание снимков, и построено разреженное облако, состоящее из 157708 точек. Рассчитаны карты глубин, и построено плотное облако точек, состоящее из 16943810 точек. На основе плотного облака точек созданы трехмерная мо-

дель и карта высот (DEM). По исходным снимкам и реконструированной модели построен ортофотоплан с разрешением 12188 х 13076 пикс.

Библиографический список

1. Геоскан [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.url: https://www.geoscan.aero/ – 14.11.2016.
2. Голубева, Е.И. Инновационные технологии в мониторинге лесных пожаров / Е.И. Голубева, С.Н. Жаринов // Вестник Российской академии естественных наук. – М., 2014. – Т. 14, № 2. – С. 67-72.
3. Зинченко, О.Н. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования [Электронный ресурс] / О.Н. Зинченко. – Режим доступа: www.url: http://www.racurs.ru/www_download/articles/UAV_1.pdf – 2011.
4. Лесоустроительная инструкция: приказ МПР России № 516 от 12.12.2011 г.
5. Никифоров, А.А. Искажения цифровых фотоснимков высокого разрешения полученных при аэрофотосъемке беспилотными летательными аппаратами / А.А. Никифоров // Информационные системы и технологии : сб. науч. тр. – СПб.: СПбГЛТА , 2011. – Вып. 3. – С.17-21.
6. Представители Рослесхоза обратили внимание на разработки беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.url: http://www.wood.ru/ru/lonewsid-10279.html – 18.08.2005.
7. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan: Professional Edition, версия 1.2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.url: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf – 10.10.2016.
8. Специальный технологический центр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.url: http://www.stc-spb.ru/ – 14.11.2016.
9. Сухих, В.И. Агрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учебник / В. И. Сухих. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – 392 с.
10. Трубников, Г. Беспилотные летательные аппараты и технологическая модернизация страны [Электронный ресурс] / Г. Трубников, В. Воронов. – URL: http://uav.ru/articles/tech_modern.pdf. – 14.11.2016.
11. Трубников, Г. Применение беспилотных летательных аппаратов в гражданских целях [Электронный ресурс] / Г. Трубников. – URL: http://uav.ru/articles/civil_uav_th.pdf. – 14.11.2016.
12. Щербаков, В. Зеленый свет беспилотникам [Электронный ресурс] / В. Щербаков. – URL: http://uav.ru/articles/green.pdf. – 14.11.2016.
13. ZALA AERO Беспилотные системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.url: http://zala.aero/. – 14.11.2016.

УДК 528.854.2 + 630*161

ИЗУЧЕНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ ПОЙМЕННЫХ ЛЕСОВ РЕКИ НАРЫН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

А.У.Чымыров[1], Э.М.Байбагышов[2], Н.К.Дегембаева[2], Н.Ы.Исмаилов[1], Т.К.Урмамбетова[1], Б.К.Айыпов[2]

[1]Австрийско-Центральноазиатский центр геоинформационных наук, Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова, Кыргызстан

[2]Нарынский государственный университет им. С.Нааматова, Кыргызстан

В статье приведены результаты исследований по применению данных дистанционного зондирования Земли и современных программных пакетов ArcGIS и ENVI для классификации и оценки растительного покрова бассейна реки Нарын. Имеющиеся картографические материалы лесных хозяйств региона не отвечают современным требованиям и нуждаются в обновлении с использованием спутниковых снимков разных систем. Было выполнено исследование мультиспектрального снимка сверхвысокого разрешения WorldView-2 в классификации растительного покрова пойменного леса в Нарынской области Кыргызстана для дальнейшего картирования и анализа. Использование снимка сверхвысокого разрешения в данной работе обусловлено особенностями классификации и картирования небольших участков растительного покрова на поймах горной реки. Выполнена контролируемая классификация спутникового снимка на основе нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI и данных полевых исследований. Результаты работы показывают высокую эффективность спутниковых снимков сверхвысокого разрешения в классификации и тематическом картировании пойменных лесов.

Ключевые слова: *дистанционное зондирование, растительный покров, ГИС, ArcGIS, ENVI, WorldView-2, классификация спутниковых снимков*

STUDY OF THE NARYN RIVER FLOODPLAIN FOREST ECOSYSTEM BY USING VERY HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGERY

A.U.Chymyrov[1], E.M.Baibagyshov[2], N.K.Degembaeva[2], N.Y.Ismailov[1],
T.K.Urmambetova[1], B.K.Aiypov[2]
[1]Austria-Central Asia Centre for Geoinformation Science,
N. Isanov Kyrgyz State University of Construction, Transportation and Architecture, Kyrgyzstan
[2]Naryn State University named after S.Naamatov, Kyrgyzstan

The results of studies on the use of remote sensing and ArcGIS and ENVI modern software packages in the land cover classification of the Naryn River basin and its analysis. Existing cartographic materials of the forestry units in the region are old and need updating by using different types of satellite imagery. The study of the WorldView-2 very high resolution multispectral image is realized for land cover classificationof the floodplain forest area in Naryn oblast of Kyrgyzstan for the further mapping and analysis. The use of the very high resolution multispectral imagery is caused by peculiar properties of classification and mapping of the small areas of vegetation cover on mountainous river floodplain. Supervised satellite image classification is realized based on NDVI values and field datasets. Study results show high efficiency of using very high resolution satellite imagery in classification and mapping of floodplain forests.

Keywords: *remote sensing, land cover, GIS, ArcGIS, ENVI, WorldView-2, satellite image classification*

Введение

Как важнейший компонент биосферы и источник ресурсов лесной покров имеет глобальное экологическое, экономическое и социальное значение. Обеспеченность информацией о состоянии и динамике лесов планеты все еще остается недостаточной и не отвечает современным требованиям устойчивого управления лесными ресурсами, охраны окружающей среды и исследований в области глобальных изменений биосферы и климата. Леса как экологические системы интересны исследователям во многих отношениях. Это самые крупные экосистемы на Земле, которые характеризуются высокой продуктивностью и в которых аккумулируется большая часть органического вещества планеты в виде древесины, детрита, гумуса, используемого затем человечеством как для собственного потребления, так и для восстановления исчезающих в процессе его хозяйственной деятельности компонентов биосферы (IPCC, 2001; Курбанов, Воробьев, 2014). Лесные массивы притягивают и распределяют влагу, снижают разрушительные свойства горных рек посредством уменьшения скорости ее потока и разделения на большое количество ручьев. Устойчивые лесные экосистемы повышают уровень увлажненности территории вдоль поймы рек. Между тем, нарушенная пойменная экосистема приводит к увеличению разрушительной силы реки, что влияет на снижение уровня увлажненности и осушение окрестностей рек за счет дренирования подземного стока. Периодические изменения русла реки и размывание берегов вызывают быстрые изменения площадей и растительного состава пойменных лесов.

Необходимость осуществления мониторинга лесов на огромных территориях, особенности природно-географических условий и недостаточное развитие инфраструктуры ряда регионов приводят к тому, что дистанционные (и в особенности спутниковые) наблюдения становятся приоритетным источником информации о состоянии и динамике лесов, что определяет актуальность развития соответствующих методов обработки получаемых данных. Дистанци-

онное зондироване Земли (ДЗЗ) обеспечивает практически недостижимое другими существующими средствами повышение уровня достоверности, оперативности и регулярности измерения ключевых характеристик состояния и динамики лесного покрова (Барталев, 2007). Применение технологий дистанционного зондирования позволяет повысить точность мониторинга и прогнозирования изменений растительного покрова Земли для решения самого широкого спектра задач (Воробьев и др., 2015; Курбанов и др., 2014; Чандра, 2008).

В последние годы во всем мире проводится большое количество исследований по использованию цифровых изображений, полученных с помощью искусственных спутников Земли, для классификации лесного покрова. Разработанные методики и алгоритмы оценки точности тематических карт с использованием космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения свидетельствуют о том, что такие материалы дистанционного зондирования могут служить основным источником данных при картировании лесного покрова и мониторинге его динамики (Терехин, 2013; Барталев и др., 2015; Курбанов и др., 2016). Использование таких снимков является очень эффективным при картировании больших лесных массивов (Курбанов и др., 2013), но их использование для классификации лесов на поймах реки Нарын не отвечает предъявляемым требованиям к тематическому картированию лесов по исследованию экосистемных услуг в рамках Международного проекта «EcoCAR - Оценка экосистемы и повышение квалификации по устойчивому управлению пойменными лесами вдоль центральноазиатских рек Тарим и Нарын» (Бетц и др., 2015). Это в основном связано с небольшими площадями многих участков лесного покрова на узких поймах горной реки шириной 5-10 м, что не позволяет выполнять их детальное картирование по снимкам среднего и высокого пространственного разрешения.

Имеющиеся карты лесных хозяйств Нарынской области Кыргызстана от 1980-х годов не отражают настоящее состояние пойменных лесов, так как за этот период быстротечная горная река Нарын значительно изменила свое русло. В настоящее время большая часть пойменных лесов на имеющихся картах Нарынского лесного хозяйства исчезли, а на месте бывшего русла рек появились другие лесные массивы, которые не отражены на существующих картографических материалах.

Целью работы является исследование и анализ применения мультиспектрального снимка сверхвысокого разрешения WorldView-2 в классификации и оценке растительного покрова в пойме реки Нарын.

Экосистема пойменных лесов реки Нарын

Крупнейшая река Кыргызстана Нарын берет начало в высоких горах Внутреннего Тянь-Шаня и стремится в жаркую засушливую Ферганскую долину. При площади бассейна 59100 км^2 ее длина достигает 807 км, наибольший расход составляет 2880 м^{3}сек$^{-1}$, питание снегово-ледниковое, в верховьях ледниково-снеговое. Река протекает по территории Иссык-Кульской, Нарынской, Джалал-Абадской областей Кыргызстана и Наманганской области Узбекистана. При слиянии с рекой Карадарья образует реку Сырдарью (Атлас Киргизской ССР, 1987).

Пойменные леса вдоль реки Нарын имеют большое значение в предоставлении экосистемных услуг для жителей расположенных вблизи населенных пунктов. Леса обеспечивают местное население дровами и строительной древесиной. В регулировании микроклимата местности, эрозионных процессов почв и качества воды роль пойменных лесов огромна при обеспечении экологической стабильности (План экологического управления Нарынской области, 2011). Благодаря древесным и кустарниковым комплексам удерживается снег на поверхности и идет более равномерное впитывание осадков. Это, в свою очередь, обеспечивает устойчивость пойм к селям и оползням.

В период повышенной водности река затапливает пойменные участки. Густой лес, образующий сплошной сомкнутый покров растительности, воздействует на испарение. Почвенная влага практически не расходуется и способствует увеличению биологического разнообразия (Егидарев, 2012).

В пойменном лесу произрастают разнообразные растения. Видовой состав таких лесов представлен как древесными породами - тополь черный (*Populus Nigra),* ива *(Salix)),* так и кустарниками - жимолость (*Lonicera*), облепиха крушиновидная (*Hippophae rhamnoides*), кизильник (*Cotoneaster*), спирея (Таволга) (*Spiraea*), гребенщик (*Tamarix*) и лох узколистый (*Elaeagnus angustifolia*) (Комплексная оценка природных ресурсов Кыргызстана, 2009).

На изучаемом участке пойменных лесов вдоль реки Нарын наблюдается изменение структуры лесного ландшафта из-за нарушения естественного процесса развития и регулирования биологических процессов. Причиной является выпас скота, который поедает вместе с травянистой растительностью подрост и самосев древесных пород, а также сбор дров местными жителями для приготовления пищи и отопления домов (рис. 1).

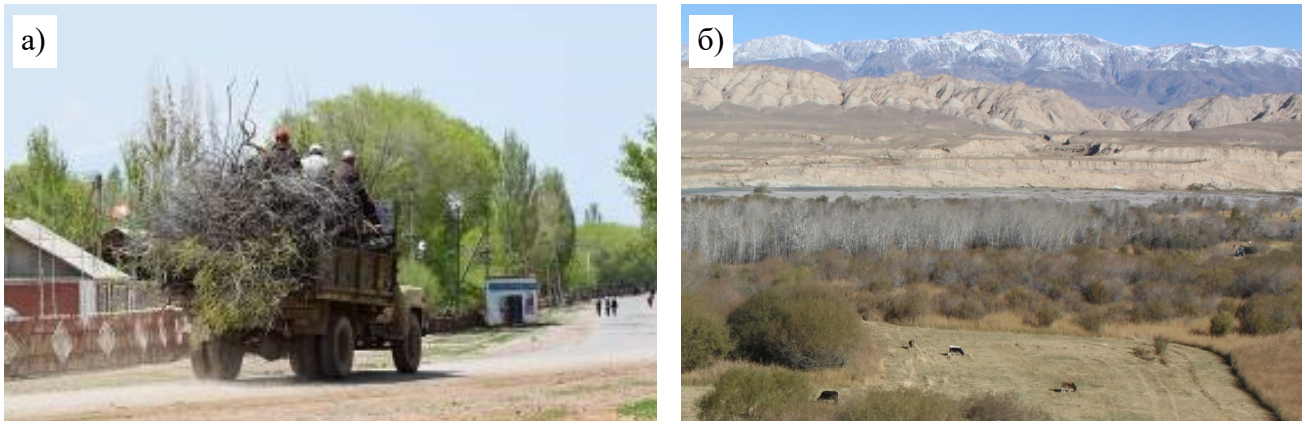


Рис.1. Экосистемные услуги пойменных лесов для местного населения:
а) запасание дров местным населением; б) выпас скота и сенокос на территории леса

Пойменные леса очень чувствительны к любым нарушениям экологического баланса. Более того, природные ресурсы, сосредоточенные в пойменных лесах, имеют не только народно-хозяйственное значение, но и являются естественной экологической лабораторией для проведения научных исследований. Основными проблемами для устойчивого роста пойменных лесов являются незаконные рубки, пастьба скота, слабое естественное возобновление, нехватка финансирования и недостаточный контроль за их состоянием со стороны компетентных государственных органов. Другую большую проблему представляет собой размывание берегов реки, уменьшающее площадь пригодных для возделывания земель. По результатам социологического опроса жителей близлежащих сел об использовании собранных из леса растительных ресурсов было выяснено, что большинство их используют для продажи. По мнению жителей, пойменные леса вдоль реки Нарын также активно используются для отдыха, охоты и рыбалки, выпаса скота и сбора дров (Бетц и др., 2015).

Методика исследований и данные дистанционного зондирования

В экологических исследованиях чаще всего используются мультиспектральные снимки, как наиболее информативные. Часть из них можно получить в свободном доступе, другие только на договорной основе. Стоимость таких снимков зависит от их конкретных характеристик. В данной работе использованы спутниковые снимки части бассейна реки Нарын. Исследуемая территория является частью отдельного лесного участка № 39 площадью 243,3 га Нарынского лесного хозяйства Нарынской области. В настоящее время имеется большое количество спутниковых систем (Landsat, ALOS, SPOT и др.), предоставляющих снимки с низ-

ким, средним и высоким пространственным разрешением, которые приемлемы для изучения, картирования и мониторинга лесов (Ohman et al, 2012; Курбанов и др., 2014).

Управляемая классификация растительного покрова и векторизация выполнены на основе мультиспектрального снимка сверхвысокого разрешения (пространственное разрешение 46 см) спутника WorldView-2 от 29 июня 2014 года из-за сравнительно маленьких участков лесного покрова на островках и узких береговых линиях горных рек. Сравнивая и комбинируя значения яркости разных каналов этого изображения, можно получить важные данные о тех или иных явлениях на поверхности Земли, которые визуально определить невозможно.

В работе применяется композиция ложных цветов FCC (False Color Composition), которая обычно используется для визуального и инструментального исследования растительности, мониторинга почвы, вод и различных стадий сельскохозяйственных культур (Исмаилов и др., 2016). Изучение и классификация растительного покрова Земли данными дистанционного зондирования в основном выполняются с определением значений нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (рис. 2а). Этот индекс характеризует также плотность растительности, что позволяет специалистам оценить всхожесть и рост растений, продуктивность угодий (Бекмухамедов и др., 2013; Михайлов и др., 2010). Индекс NDVI определен как разность значений отражения в ближней инфракрасной и красной областях спектра, деленная на их сумму, по формуле

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где NIR - ближний инфракрасный канал, а RED - красный канал. В результате значения NDVI меняются в диапазоне от -1 до 1. Для зеленой растительности за счет поглощения света хлорофиллом отражение в красной области всегда меньше, чем в ближней инфракрасной, поэтому значения NDVI для растительности на снимках WorldView-2 не могут быть меньше 0 (рис. 2б).

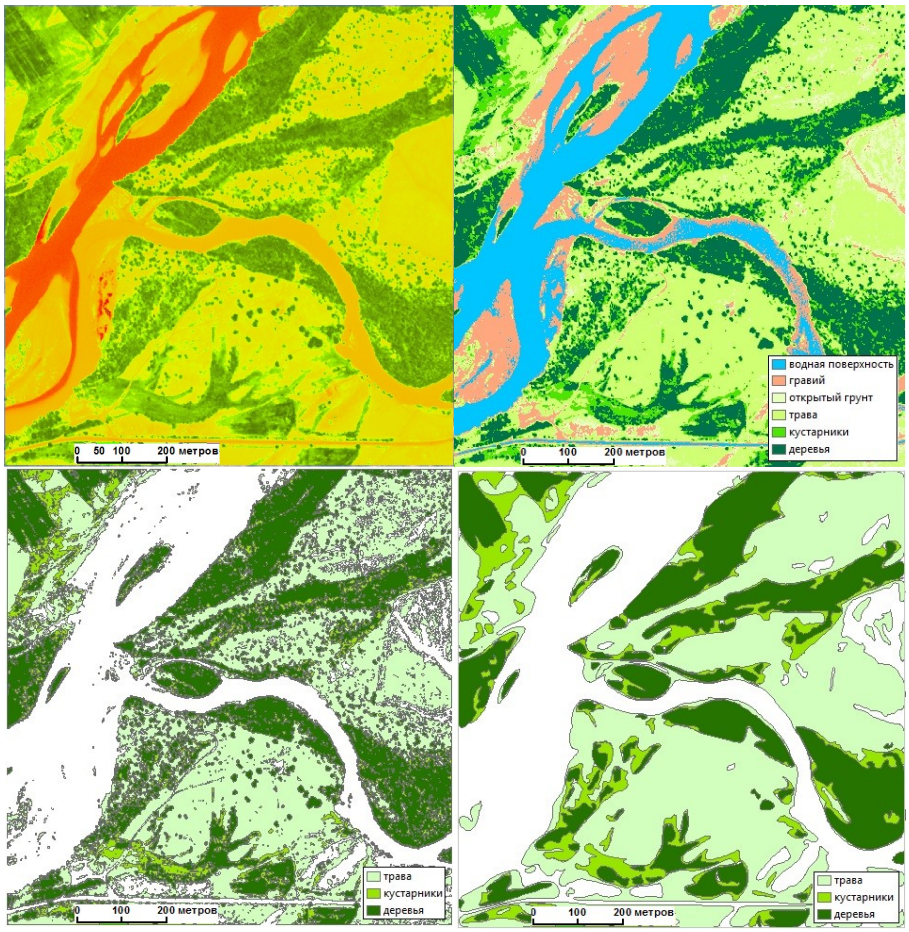


Рис.2. Контролируемая классификация спутникового снимка в ПО ArcGIS: а – вычисление NDVI; б – классификация снимка; в – векторизация растительности; г – электронная карта растительности

Для анализа показателей лесного растительного покрова были использованы программные пакеты ENVI 4.5 и ArcGIS 10.1. Для количественной оценки состояния растительности с помощью этих программ были выполнены расчеты на примере участка Нарынского лесхоза.

При выполнении управляемой классификации (supervised classification) проводятся идентификация и определение местонахождения некоторых видов растительного покрова, городских и сельских тер-

риторий, водно-болотных угодий, с известными характеристиками после полевых работ. При этом на снимке происходит распознавание всех классов, являющихся заданными пользователем объектами, через представление «образцов» этих объектов (их спектральных кривых) в программе по обработке спутниковых снимков. Иначе говоря, программа выделяет на снимке все классы, которые являются типами объектов, примеры которых на снимке пользователю известны и которые он задает программе в качестве «образцов» (Калашникова и др., 2015).

Классы наземного покрова изучаемых объектов местности (лес, кустарники, открытые участки, водная поверхность, дороги и др.) и их географические координаты были определены во время полевых работ и спутникового позиционирования.

Результаты

Анализ снимка показал, что средние значения NDVI пойменных лесов в районе исследований варьируют от 0,53 до 0,87, кустарники – от 0,24 до 0,52. Результаты классификации NDVI позволили провести дальнейшую автоматизированную векторизацию спутникового снимка (рис. 2в). Окончательная обработка снимка и создание электронной карты растительности участка пойменного леса была выполнена генерализацией и сглаживанием полигонов растительного слоя (рис. 2г).

Полученная электронная карта с высокой детализацией позволяет быстрое получение информации о площади пойменных лесов и других типов растительности. Своевременный учет и анализ изменений растительного покрова на поймах горных рек позволяют решать многие проблемы, связанные с рациональным использованием природных ресурсов, защитой окружающей среды и оказанием экосистемных услуг.

Выводы

Экосистема пойменных лесов вдоль реки Нарын играет очень большую роль в социально-экономическом развитии региона и жизни местного населения. Она также регулирует микроклимат местности, уменьшает эрозионные процессы и обеспечивает экологическую стабильность региона. Отсутствие картографических материалов, отражающих настоящее состояние лесов, является большой проблемой в лесном хозяйстве Кыргызстана. Использование данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий позволяют решать эту проблему с высокой эффективностью и в кратчайшие сроки.

Исследование показало, что контролируемая классификация снимков по NDVI позволяет использовать спутниковые снимки сверхвысокого разрешения WorldView-2 в исследовании и картировании растительного покрова пойменных лесов. Требуется использование других методов и инструментов дистанционного зондирования и ГИС для окончательного оформления тематических или топографических карт. Результаты обработки данных мультиспектрального снимка дают типы растительности и землепользования для дальнейшей автоматизированной векторизации всех классов объектов для электронной карты местности.

По результатам обработки спутниковых снимков сверхвысокого разрешения появляются широкие возможности для изучения изменений типов землепользования, картирования и планирования экосистемных услуг и рационального использования лесных ресурсов.

Авторы выражают свою признательность Фонду Фольксваген, финансирующему научные исследования в рамках Международного проекта «EcoCAR - Оценка экосистемы и повышение квалификации по устойчивому управлению пойменными лесами вдоль Центрально-Азиатских рек Тарим (Синьцзян, Китай) и Нарын (Кыргызстан)».

Библиографический список

1. Атлас Киргизской ССР// ГУГК при СМ СССР. – 1987. – Т.1. – 179 с.
2. Барталев, С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 203-221.

3. Барталев, С.А. Разработка методов оценки состояния и динамики лесов на основе данных спутниковых наблюдений / Автореф. дисс... д-ра тех. наук. – М., 2007. – 48 с.
4. Бекмухамедов, Н.Э. Оценка информативности разных вегетационных индексов для определения проективного покрытия пастбищ [Электронный ресурс] / Бекмухамедов Н. Э., Муратова Н. Р. //Сельское, лесное и водное хозяйство. – 2013. – № 1. – Режим доступа: http://agro.snauka.ru/2013/01/830.
5. Бетц, Ф. ГИС для управления окружающей средой вдоль рек Тарим и Нарын / Ф. Бетц, У. Халик, Б. Сыфка, А. Курбан, А. Чымыров, Э. Байбагышов, Ж. Динг // Материалы ГИС конференции Центральной Азии «Геопространственное управление землей, водой и ресурсами». – ТИМИ, Ташкент. – 2015. – С. 13-18.
6. Воробьев, О.Н. Методика пошаговой классификации спутниковых снимков для тематического картирования лесов / Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Губаев А.В., Демишева Е.Н. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 4 (28). – С. 57-72.
7. Воробьев, О.Н. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat / О.Н. Воробьёв, Э.А. Курбанов, Ю.А. Полевщикова, С.А. Лежнин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – № 4 (13). – С. 124-134.
8. Егидарев, Е.Г. Картографирование и оценка пойменных комплексов в долине реки Амур / Е.Г. Егидарев // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2012. – № 2 (162). – С. 9-16.
9. Исмаилов, Н.Ы. Исследование и оценка лесов бассейна реки Нарын методами дистанционного зондирования / Н.Ы. Исмаилов, Т.К. Урмамбетова, А.У. Чымыров // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К.Скрябина. – 2016. – №1 (37). – С. 195-201.
10. Калашникова, Л.Г. Использование материалов космических съемок с целью картографирования в ГИС-пакете ArcGIS / Калашникова Л. Г., Афанасьев М. А. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:// journal.mrsu.ru/wp-content/uploads/2015/11.
11. Комплексная оценка природных ресурсов Кыргызстана. Руководство по полевым работам. – Бишкек: 2009. – 112 с.
12. 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.
13. 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. – № 1 (13). – С. 36-48.
14. Курбанов Э.А. Лесоводство. Международное лесное хозяйство: учебное пособие / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев // Йошкар-Ола. – 2014. – 254 с.
15. Курбанов, Э.А. Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Незамаев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2013. – № 3. – С. 72-82.
16. Михайлов, Н.Н. Использование временных рядов вегетационного индекса NDVI для мониторинга растительного покрова степной зоны западной Сибири / Н.Н. Михайлов, Л.А. Михайлова, Н.Ф. Харламова, Ч. Лхагвасурэн // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2010. – № 15 (86). – Т. 12. – С. 25-33.
17. План экологического управления Нарынской области / Нарынская областная государственная администрация, Координационный Совет по созданию Плана Нарынской области // Нарын. – 2011. – 51 с.
18. Терехин, Э.А. Применение данных спутниковой съемки для анализа многолетних изменений в лесах Белгородской области /Э.А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 70–80.
19. Чандра, А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра , С.К. Гош. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
20. Houghton, J.T. IPCC: Climate change 2001: The Scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental panel of Climate Change / J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.) // Cambridge University Press. – 2001. – 881 p.
21. Ohmann, J.L. Mapping change of older forest with nearest-neighbor imputation and Landsat time-series / J.L. Ohmann, M.J. Gregory, H.M. Roberts, W.B. Cohen, R.E. Kennedy, Z. Yang // Forest Ecology and Management. – 2012. – № 272. – P. 13-25.

REMOTE MONITORING OF WATER AREA IN DONGPING LAKE OF SHANDONG PROVINCE

Sun Xingqi, Wang Jinliang, Li Jia, Liu Guangjie
College of Tourism and Geographical Sciences, Yunnan Normal University, Kun Ming, 650500

Dongping Lake is an important freshwater lake of China. The area of Dongping Lake of 1994-2015 was monitored and analyzed by using MNDWI. The results showed that the water area of the

Dongping Lake was reduced in 1994-1996 and 1997-2000, changed greatly in 2000-2004, remained unchanged basically in 2006-2008, and reduced during the periods of 2000-2015 totally. The largest water area is in 2003, the largest area of 14684 hectares. The secondly is in 2001. In 2015, the area was the smallest, with a minimum area of 10788 ha, followed by 1996. Sspatial analysis function of GIS was used to calculate the water area of Dongping Lake in last 20 years. The stable water area is 101 km^2, the water area of Intermittent is 45 km^2. The unstable product surface is mainly distributed in the East, the north and the southwest. Through the comparison and discovery, the surface has better effect on the extraction of shallow water area and it is more suitable for the monitoring of seasonal lake water area. The main reasons are annually variation of rainfall and manual control. In order to maintain ecological stability of the Dongping Lake, we should reduce the interruption of people.

Keywords: *MNDWI, Dongping Lake, Landsat, Spatial analysis, GIS*

Introduction. The lake is an important element in the geographical unit, it plays an important role in maintaining ecological balance, regulating climate drought and preventing flood and waterlogging disasters (Ji et al., 2015). Monitoring the change of the lake area and understanding the law of the lake has important practical significance. Remote sensing technology provides a rapid economic method for obtaining the lake area and Geographic information technology provides an important tool for the analysis and analysis of Lake area.

NDWI (Normalized Difference Water Index) can highlight water body information in image by using the normalized difference of the specific bands of remote sensing image. NDWI is based on green band and near infrared band. It is the most common method to extract the lake water at present. MNDWI is the improvement of the NDWI and it is based on green band and mid infrared band. It can suppress the information of other objects. Dongping Lake waters are shallow, the MNDWI is better to extract the effect of the Dongping Lake waters than the NDWI. This study through the method of remote sensing monitoring by using the Landsat TM and Landsat OLI image data, the area of Dongping lake water area was extracted by the MNDWI in different period, and the variation characteristics of the Dongping Lake area was obtained in last 20 years. The spatial analysis function of GIS was used to analyze the data, and the spatial characteristics of Dongping Lake area was obtained.

Study Area and Data Sources. Dongping Lake is located in Dongping County, Shandong Province, which is an important freshwater lake in China. Dongping Lake is a total area of 632 km^2, and it is a large reservoir to ensure safety of the downstream of the Yellow River. It is can against Zhengzhou Huayuankou Mega flood peak flow of 22000 m^3 / sec, to ensure the safety of the downstream. The old Lake District is in the northeast, and it is 209 km^2. Also known as the new Lake flood detention area is in the southeast, it has an area of 423 km^2, and most of them are agricultural land. Dawen River drain into the old district of Dongping Lake. Then the River water flow into the Yellow River.The Dawen River and the old Lake District belongs to the Yellow River Basin, the new lake district belongs to Huaihe basin. Therefore, it is of great practical significance to study the change of water area in Dongping Lake for preventing flood disaster and guiding people's production and life.

This research data is the Landsat satellite series data from geographic spatial data cloud (http://www.gscloud.cn/). The downloaded images had geometric correction based on the image that the get date is in 2000. Data is specific (Tab. 1).

Research methods. The common methods about the extraction of water area include single band threshold method, the analysis of multi band threshold method, supervised classification, decision tree classification, Tasseled cap transformation component method, etc (Fig.1). Due to the small area near the lake in Dongping Lake with relatively flat terrain. In this study, we use the nor-

Table 1

The Remote sensing data

Get date	Satellites/Sensors	Get date	Satellites/Sensors
1994．09．29	Landsat5/TM	2005．09．04	Landsat5/TM
1995．10．11	Landsat5/TM	2006．09．23	Landsat5/TM
1996．06．30	Landsat5/TM	2007．09．01	Landsat5/TM
1997．09．21	Landsat5/TM	2008．06．08	Landsat5/TM
1998．05．28	Landsat5/TM	2009．09．22	Landsat5/TM
2000．09．13	Landsat5/TM	2010．08．17	Landsat5/TM
2001．09．09	Landsat5/TM	2011．07．10	Landsat5/TM
2002．08．27	Landsat5/TM	2013．09．01	Landsat8/OLI
2003．09．15	Landsat5/TM	2014．09．04	Landsat8/OLI
2004．07．22	Landsat5/TM	2015．09．07	Landsat8/OLI

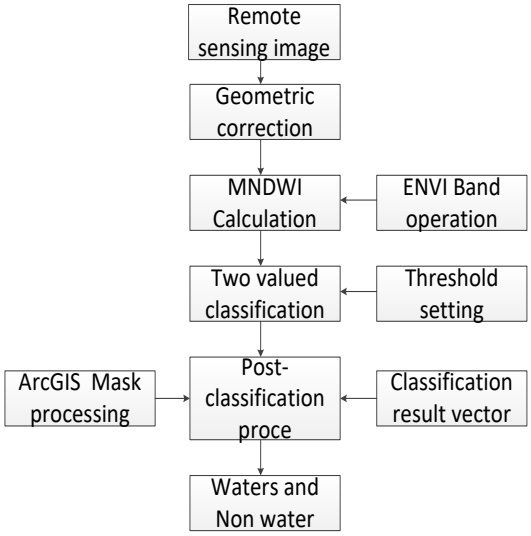


Fig. 1. The Flowchart of extraction Dongping Lake area

malized water index method in the multi band threshold method; it is that using the normalized difference of the specific bands of remote sensing image to deal with the water body information. Currently, it more commonly used is NDWI and MNDWI. The MNDWI is more capable of revealing the micro characteristics than the NDWI, such as distribution of sediment and the variation of water quality:

$$MNDWI=(p(Green)-p(MIR))/(p(Green)+p(MIR)) \quad (1)$$

$$NDWI=(p(Green)-p(NIR))/(p(Green)+p(NIR)) \quad (2)$$

where *p(Green)* is green band, *p(NIR)* is near infrared wave band，*p(MIR)* is mid infrared band.

In this study, by comparing the results of the NDWI and the MNDWI extraction of the waters, the result of the study found that the MNDWI have a better effect on the Extraction of water area of the Dongping Lake (Fig.2).

Amplification of the MNDWI index chart of the amplified output boundary histogram, the right to select multiple histogram trought the transition point as the best peak threshold (Fig. 3). Using ENVI software band operation (3) to make the image become two valued, the value of the two results of grid map into ArcGIS software, making the results of the grid after the two value of the grid become vector diagram, removing the rivers and other fragmentary patches by mask.

$$(b1\ ge\ a)*0+(b1\ lt\ a)*1 \quad (3)$$

among *b1* is MNDWI，*a* is threshold.

The water area of the Dongping lake (Fig. 4) was obtained in each year.

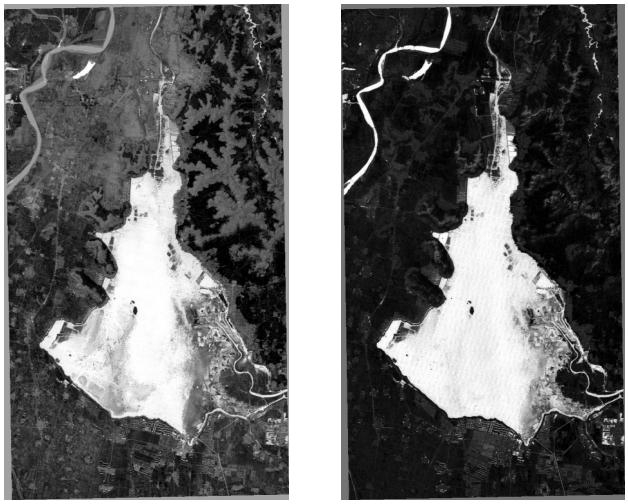


Fig. 2. The NDWI (left) and the MNDWI (right) in 2000

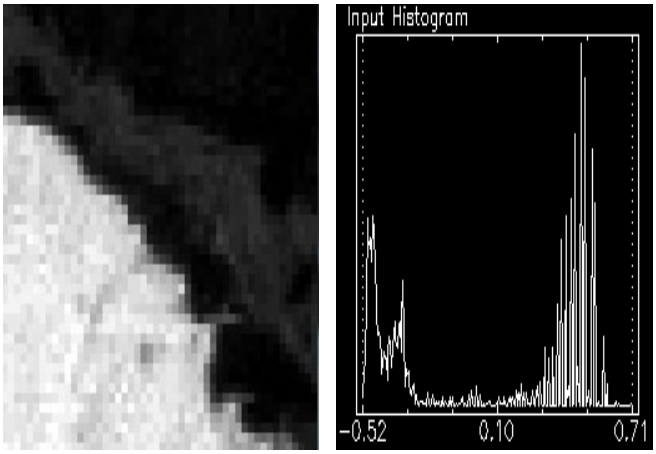


Fig. 3. The MNDWI (left) and histogram (right) of the magnification Boundary

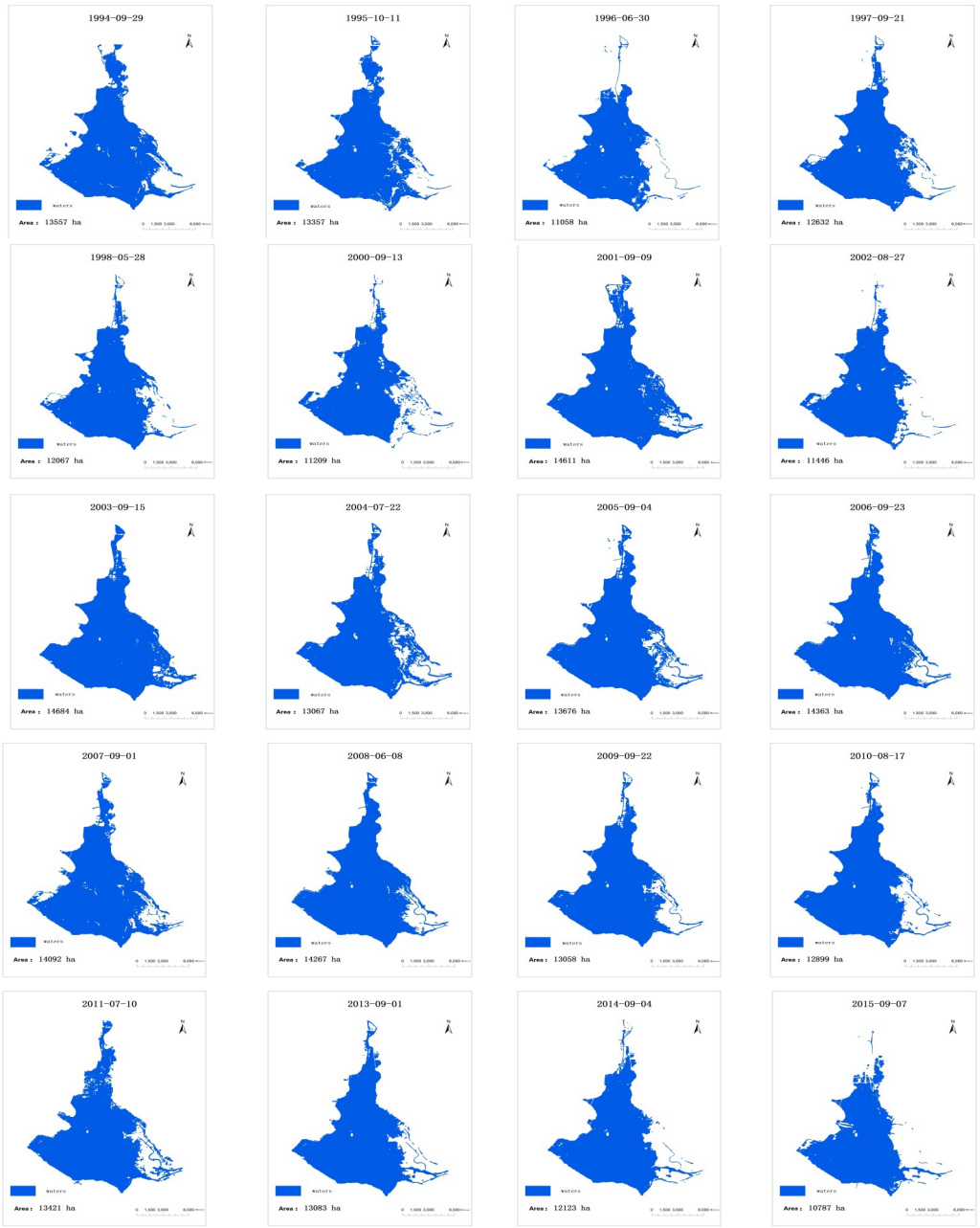


Fig. 4. The Map of Dongping Lake waters in each year

5. Results and analysis

5.1. Water area changes of Dongping lake.

The statistical analysis function of ArcGIS has been used to evaluate the area of each year in the water area of Dongping Lake, and the change of water area in Dongping Lake is calculated by Excel (Fig. 5) .

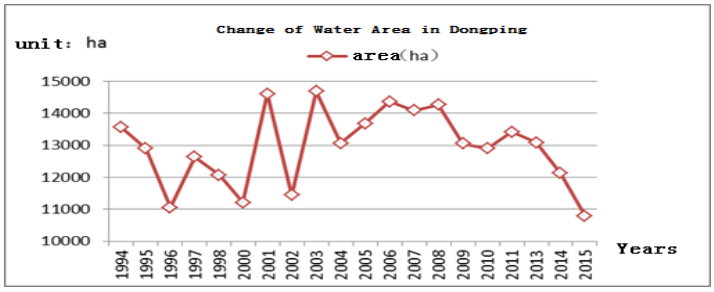


Fig. 5. The area change of Dongping Lake waters

The largest waters area is in 2003, the largest area of 14684 hectares. The secondly is in 2001; in 2015, the area was the smallest, with a minimum area of 10788 ha, followed by 1996. The water area is reduced during 1994-1996 and 1997-2000; the water area changed greatly during 2000-2004, the water area remained unchanged basically during 2006-2008; the water area is reduced during 2005 -2015, reaching the minimum in 2015.

5.2 Analysis of spatial structure of Dongping lake waters

By using the superposition analysis function of ArcGIS software, the area of Dongping Lake lake was analyzed for 20 years, and the stable area of water accumulation in Dongping Lake was obtained; Using the combined function of ArcGIS software to merge the Dongping lake area for two decades, and then removing the water stable region to get the astable Dongping lake waters of the 20 years; Finally, the spatial structure of the Dongping lake waters in the past 20 years (Fig. 6) was obtained by combining the water stable and the unstable area. The stable water area of Dongping lake is 10513 hectares, and the unstable area is 9123 hectares by statistical calculation of ArcGIS. It can be seen from the figure that the unstable product surface is mainly distributed in the East, the north and the southwest. The west coast shoreline and the south coast shoreline is relatively stable. In this regard, people can be based on the spatial structure of the Dongping lake to assess the risk of growing crops, rational planning of planting in the Dongping lake basin, which is of great significance for the guidance of the local people's production and life.

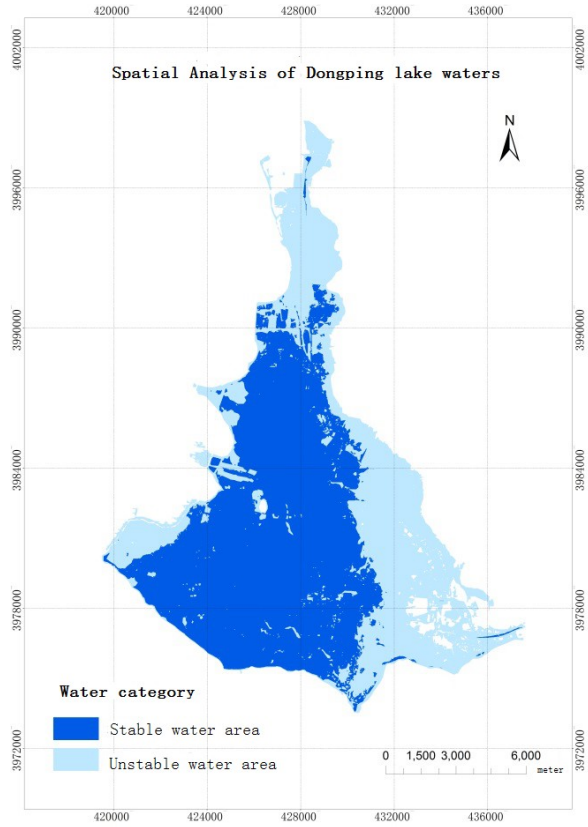


Fig. 6. Spatial Analysis of Dongping lake waters

Conclusion. The total area of Dongping lake waters was reduced in recent 20 years, reduced nearly 2800 hectares. The waters area of Dongping lake is smaller in 1996, 2000 and 2015, respectively, 11057 ha, 11209 ha and 10788 ha. The largest waters area of Dongping Lake is in 2003, it is about 14684 ha. The unstable water area of Dongping lake is main in the north and southeast where is the river junction. It directly reflects the influence of the river to the area of the Dongping lake. It can underline the role of Dongping Lake in preventing flood and waterlogging disasters.

By accurately obtaining the water area of Dongping Lake, it fully reflects the feasibility and convenience of water area remote sensing monitor. Through the comparison and discovery, the

MNDWI has better effect on the extraction of shallow water area and it is more suitable for the monitoring of seasonal lake water area. By obtaining the distribution of the unstable waters and the stability of the water area, it can provide guidance for the local people's production and life and it can provide the basis for prevention of flood disaster and reducing economic losses. The water area of Dongping lake is far less than the area of Dongping lake basin, It can be seen that Dongping lake is very important to regulate flood ensure safety of the downstream of the Yellow River.

In this study, the water area of Dongping lake was extracted accurately and quickly by the combination of RS and GIS; In this study, the remote sensing images were selected at the peak period and it can avoid the seasonal effects to extract the water area, though, the inter annual monitoring of the water area in Dongping lake is effective.It can provide recommendations for relevant departments to governance and development of Dongping lake.

List of references

1. Ji, H.X. Accuracy comparison and analysis of methods for water area extraction of discrete lakes / H. X. Ji, X.W. Fan, P.G. Wu and Y.B. Liu //Journal of Lake Sciences. – 2015. – 27(2). – P. 327-334.
2. Li, W.B. Study on estimation of water area based on normalization index/W.B. Li, C.Y. Yu, Q.W. Zhang and B. Gao//Yangtze River. – 2008. – 39(2). – P. 8-12.
3. Tian, Y. Application of the method of extraction of reservoir surface area based on GIS and remote sensing /Y. Tian, J.Z. Lin, S.X. Lu,Y, Liang and L.P. Qiao//Water Resources Protection. – 2008. – 24(3). – P. 30-33.
4. Tian, Y. Reservoir Water Level-Water Surface Curve Measurement Based on GIS and TM Image / Y. Tian, J.Z. Lin, S.X. Lu and Y. Liang// Geospatial information. – 2007. – 5(2). – Pp. 8—10 .
5. Wu, W.Y. A Integrated Method for Water Body Detection and Delineation Using Land sat ETM+ data/ Y.W. Wu, H.X. Shen, J.L. Zou, L.S. Lu and F.G. Zhang // Bulletin of Science and Technology. – 2008. – 24(2). – P. 252-259.
6. Wu, C. Water Surface Monitoring of the Danjiangkou Reservoir using Remotely-sensed Landsat TM/ETM and HJ-1A/B Imagery / C. Wu, L.Y. Zhang, Z.X. Xu and F.Q. Zhang // Resources and Environment in the Yangtze Basin. – 2013. – 22(9). – P. 1207-1213.
7. Xiong, J.G. Influence of Landscape Pattern Index on the Area Extracted from ETM + and MODIS / G.J. Xiong, X.S. Wang, Y. Zhou and L.F. Yan // Geomatics and Information Science of Wu han University. – 2011. – 36(1). – P. 98-103.
8. Yang, Y. Extraction of Plain Lake Water Body Based on TM Imagery / Y. Yang, Z.R. Ruan // Remote Sensing Information .– 2010. – 3(2). – P. 60-64.
9. Zhao, Y.L. Spatio-temporal variation of water area in East Dongting Lake and Three Gorges Reservoir /L.Y. Zhao, G.Z. Xu, M.Y. Li, Y.D. Sun, J. Tan and S.S. Wang // Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences). – 2014. – 40(6). – P. 643-649 .
10. Zhang, B.L. The Water Body Area Changes of Dalainur Lake Based on Satellite Images of Remote Sensing / L.B. Zhang, C.R. Jia, Q. Zhang and G. Cheng // Research of Soi1 and Water Conservation. – 2011. – 18(6). – P. 196-199.

УДК 630*23

ОСОБЕННОСТИ ЛЕСООБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В ЛИПНЯКАХ И НА ИХ ВЫРУБКАХ В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН

М.В. Мартынова, Р.Р. Султанова
Башкирский государственный аграрный университет

Представлены результаты исследования лесообразовательного процесса в насаждениях липы мелколистной и на их вырубках в границах лесных массивов Республики Башкортостан. Рассмотрено влияние сплошных узколесосечных рубок на развитие подроста последующей возрастной генерации. Доказана зависимость количественных и качественных характеристик подроста предварительной возрастной генерации от полноты древостоя. Выявлено, что сезон проведения сплошной узколесосечной рубки в липняках в зависимости от сезона (зима, лето) определяет состав последующего возобновления: летняя вырубка характеризуется доминированием второстепенных древесных пород, таких как клен остролистный (Acer platanoides L.) и вяз шершавый (Ulmus glabra), что свидетельствует о процессе смены главной породы, возобновление на участке зимней вырубки представлено порослевыми экземплярами липы мелколистной (Tilia cordata Mill).

Ключевые слова: *липа мелколистная, вырубка, естественное возобновление, порослевина, подрост.*

FEATURES OF FOREST-FORMING PROCESS IN LIME_TREE FORESTS AND ON THEIR FELLING IN THE BASHKORTOSTAN REPUBLIC

M.V. Martynova, R.R. Sultanova
Bashkir State Agrarian University

The paper presents the research results of forest forming process in stands of Tilia cordata Mill and on their fellings within the boundaries of forests of the Republic of Bashkortostan. The influence of continuous stripped-couple felling on the development of undergrowth of subsequent age generation was considered. The dependence of quantitative and qualitative characteristics of the undergrowth of preliminary age generation on the fullness of the tree stand was proved. It was revealed that the season of carrying out continuous stripped-couple elling in lime-tree forests depending on the season (winter, summer) determines the composition of the subsequent regeneration: summer felling is characterized by the dominance of secondary tree species such as Norway maple (Acer platanoides L.) and wych-elm (Ulmus glabra), which indicates the process of changing the main breed, the renewal on the site of the winter felling coppice represented by instances of the Linden (Tilia cordata Mill).

Keywords: *Tilia cordata Mill, felling, natural regeneration, coppice shoot, undergrowth.*

Введение. Лесовосстановление вырубок коренными лесообразующими породами - одна из важнейших проблем лесоводства (Алексеев, 1954; Рябцев, 2013), в частности и для лесов Республики Башкортостан (РБ), где одной из главных лесообразующих пород является липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill). В лесном фонде по площади липа занимает второе место. Несмотря на ежегодное увеличение ее площади, ввиду неполного освоения расчетной лесосеки, несвоевременного проведения ухода за лесом и рубок по заготовке древесины, происходит накопление спелых и перестойных насаждений, запасы которых в республике превышают 104,82 млн м^3, что влечет за собой снижение комплексной продуктивности, распад насаждения и нежелательную смену пород. Присутствие в насаждении значительного количества древостоев липы мелколистной старших возрастных групп, отсутствие под их пологом семенного возобновления вызывает необходимость решения вопросов целенаправленного лесовосстановления (Соколов, 1983; Sokolov and Kurbanov, 1999; Султанова, 2006). Большинство вырубок липовых лесов остается под естественное заращивание малоценными лиственными породами (клен, вяз), что обуславливает необходимость изучения закономерностей возобновления и сохранения ценного генофонда липовых лесов. В зарубежных изданиях вопросам, связанным с доминированием лиственных пород на вырубках и сукцессионным процессам в насаждениях, уделяется большое внимание (Kubner, 2003; Taylor, Lorimer, 2003). Предыдущими исследованиями установлено, что формирование липового древостоя напрямую взаимосвязано с ходом лесовозобновительных процессов в них. Липа выступает в качестве основного конкурента на вырубках для возобновления как лиственных, так и хвойных пород (Сукачев 1965; Султанова, 2006)

Цель исследования состоит в выявлении особенности возобновления под пологом древостоя и на участках, пройденных сплошными узколесосечными рубками в разные сезоны года (летний и зимний), на основании изучения лесообразовательного процесса в липовых лесах РБ.

Методика и объекты исследования. Полевые исследования проводились на пробных площадях (ПП), которые закладывались в соответствии с ОСТ 56-69–83 «Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки» с использованием общеизвестных в лесной таксации

методов. На ПП велись длительные наблюдения и экспериментальные исследования. Опыты проведены на базе лесов Нурлинского участкового лесничества Уфимского лесничества. Пробные площади представлены тремя секциями по 0,25 га: в первой секции проводилась сплошная узколесосечная зимняя рубка (ПП3); во второй - сплошная узколесосечная летняя рубка (ПП2); один участок выбран в качестве контроля (ПП1). Учет возобновления проводился через 2 года, 8 и 20 лет после проведения рубки. Анализируя качественные характеристики поросли, учитывали диаметр побега у шейки корня при разных интервалах высот отдельно на летней и зимней рубках (Мартынова, 2014, 2015). Для учета численности подроста и подлеска заложено 15 учетных площадок 10х10 м, располагающихся на трансектах по диагонали участков. По состоянию подрост и подлесок разделен на три категории: жизнеспособный, нежизнеспособный и сухой. По высоте – на категории крупности: мелкий - до 0,5 м, средний – 0,51-1,5 м и крупный – более 1,5 м.

Результаты и обсуждение. При исследовании лесовосстановительных процессов необходимо особое внимание обратить на динамику площади насаждений. На 01 января 2014 г. общая площадь покрытых лесом земель Республики Башкортостан составила 5183,5 тыс. га, липа распространена на площади 1111,3 тыс. га, что составляет 21,4 % .

Динамика площадей липняков с распределением по группам возраста показывает доминирование площадей приспевающих, спелых и перестойных насаждений. Распределение далеко от оптимального: молодняки занимают 7,8% площади, средневозрастные – 33%, приспевающие – 11,3%, спелые и перестойные – 47,9%. Наблюдается снижение запаса приспевающих древостоев, за шестилетний период он снизился практически на 2 млн. м^3. Общий средний

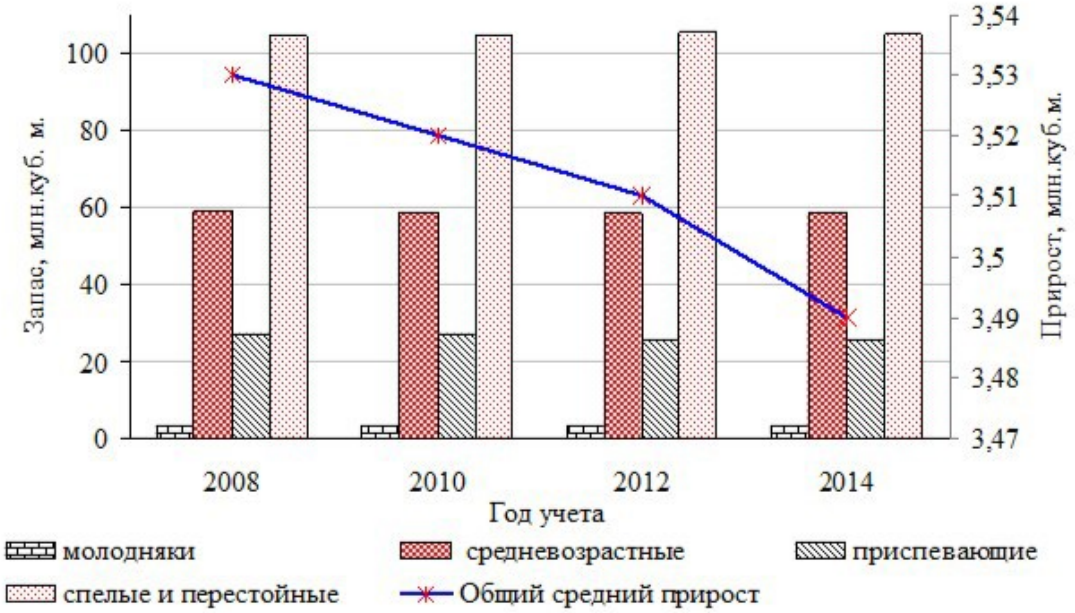


Рис. 1. Распределение запаса липняков РБ по группам возраста

Средний возраст липового древостоя 59 лет со средней полнотой 0,74 и средним классом бонитета – II.

С целью изучения состояния подроста под пологом липового древостоя было заложено 3 ПП, на каждой из которых расположено по 9 учетных площадок. На рассматриваемых объектах в составе материнского полога липа доминирует, занимая при этом не менее 80 % состава древостоя. Относительная полнота на объектах исследования от 0,5 до 0,9 (табл. 1).

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоев на опытных участках (учет 1993 и 2013 гг.)

№ ПП	Год учета	Состав древостоя	А, лет	Дср, см	Нср, м	Бонитет	Полнота	Тип леса
1	1993	10Лп	70	26,5	22,2	II	0,5	Сн
	2013	10 Лп+Кл	90	29,3	24,0	II	0,5	Сн
2	1993	10 Лп+Кл	70	25,6	21,9	II	0,7	Сн
	2013	8Лп2Кл+В	90	27,8	24,2	II	0,6	Сн
3	1993	10 Лп+Б+Кл	70	25,8	22,0	II	0,9	Сн
	2013	8Лп2Кл+Б	90	29,5	24,3	II	0,7	Сн

Исследования закономерностей формирования подроста под пологом липняков показало, что естественное возобновление на ПП происходит в основном за счет клена остролистного (*Acer platanoides* L.), вяза шершавого (*Ulmus glabra*) и в меньшей степени липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill).

Распределение подроста по категориям крупности свидетельствует о преобладании мелкого и среднего подроста липы и клена и крупного подроста вяза. Сухостойные экземпляры представлены в основном вязом и кленом.

На всех ПП подрост имеет схожий состав с преобладанием клена семенного происхождения, липовый подрост занимает не более 20 % в общем составе (от 0,32 до 0,53 тыс. шт. га$^{-1}$).

Основу подроста под пологом материнского древостоя составляют экземпляры вегетативного происхождения. Семенные экземпляры представлены кленом, дубом и березой, это разновозрастный подрост с высотой от 0,85 до 8,3 м. Наилучшим образом развит подрост клена, который равномерно размещен по площади и встречается даже в условиях сильного затенения. Рассчитанный показатель жизненности подроста свидетельствует о том, что в целом популяция считается здоровой (Алексеев, 1989), так как данный показатель варьирует от 80 до 97%.

Согласно исследованиям Р.Р. Султановой (2006), рубка древостоя оказывает существенное влияние на порослевую способность липы мелколистной. Увеличение числа вегетативных экземпляров липы на вырубках, в сравнении с возобновлением под материнским пологом, вызвано хорошим ростом пневой поросли.

Таксационный анализ ПП 2013 года показывает численное уменьшение количества поросли (табл. 2).

Таблица 2

Лесовосстановление на вырубках 1993 г. в зависимости от сезона рубки (учет 2013 г.)

Порода	Общее количество гнезд, шт.			Среднее количество побегов в гнезде, шт.	Средний диаметр, см			Кол-во, тыс. шт./га
	Всего	Из них			при высоте, м			
		сухих	полностью распавшихся		до 0,5	0,5-1,5	более 1,5	
Летняя рубка (ПП №2)								
Лп	20	-	4	3,5	0,5	0,5	7,0	0,2
В	74	7	8	9	-	0,6	4,3	2,1
Кл	8	-	-	3	0,5	0,5	7,2	0,1
Итого	102	7	13					2,4
Состав			1Лп9В+Кл					
Зимняя рубка (ПП№3)								
Лп	41	-	-	6	-	0,8	7,6	0,98
В	34	5	4	6	-	0,5	5,0	0,6
Кл	5	-	-	3	-	-	10,3	0,06
Итого	80	5	3					1,64
Состав			6Лп4В+Кл					

Летняя вырубка (2013 г.) на 88 % представлена вязом, зимняя – липой (60%). Наиболее интенсивный возобновительный процесс характерен для летней рубки, это вызвано интенсивным возобновлением вяза, липа на летней рубке представлена всего лишь 8 %.

Изменение среднего диаметра по группам высот представлено в диаграмме на рисунке 2. На зимней вырубке у липы при высоте побега более 1,5 м диаметр у шейки корня составляет 7,6 см, при высоте 0,5-1,5 – 0,8 см, на летней 7,0 и 0,5 см соответственно (td (зима) = 39, td (лето) = 32,5, Pt > 99,7%).

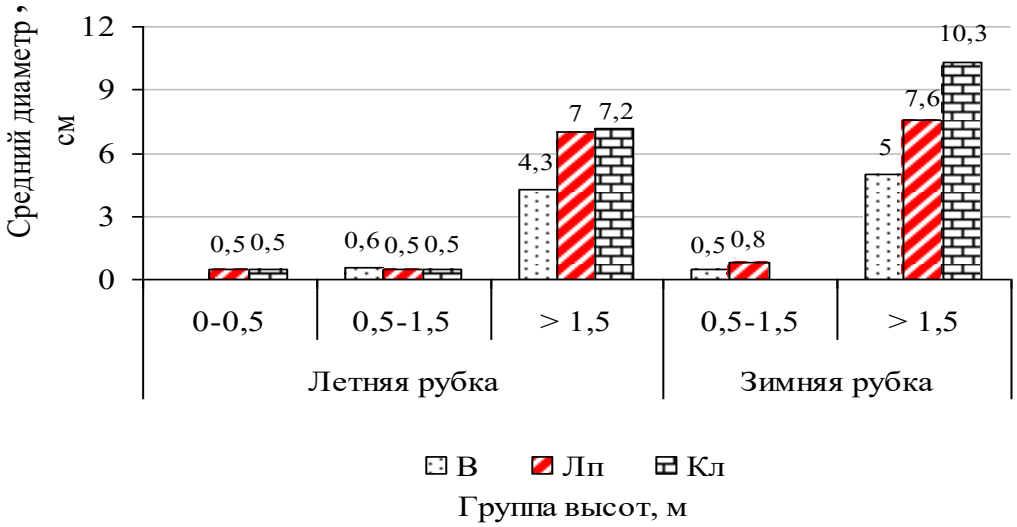


Рис. 2 Изменение среднего диаметра по высотным группам

Максимальные показатели роста характерны для клена, значительно ниже они у вяза. Рубка липового древостоя приводит к продолжительному появлению новых побегов в порослевых гнездах, параллельно с этим идет дифференциация и самоизреживание порослевин (Габделхаков, 1998; Мартынова, 2013, 2015; Султанова, 2006). Подобного мнения придерживается K.D. Coates (2002), который важнейшее значение для возобновления леса видит не только в возобновительной способности древесной породы, но и в дальнейшем развитии и выживаемости подроста.

Анализ структуры отпада показал, что на вырубках разных сезонов года интенсивность отпада разная в зависимости от видовой представленности. Отпаду подвержены в первую очередь порослевины тонкомерные (диаметр 4,1±0,11 см).

На ПП присутствуют как порослевые, так и семенные экземпляры. Липовая поросль, благодаря мощной корневой системе растет быстро, в то время как семенные экземпляры должны формировать собственную корневую систему на протяжении более десятка лет.

При учете семенного возобновления на вырубках (табл. 3) выявлено преобладание среди семенных экземпляров на летней рубке клена (0,336 тыс. экз./га), на зимней – ивы (0,128 тыс. экз./га).

Таблица 3

Лесовосстановление на ПП (учет 2013 года)

Способ лесовосстановления								
Порослевое			Семенное					
Древесная порода								
Лп	В	Кл	Кл	В	Д	Б	Ив	Ос
Количество тыс. экз./га в зависимости от сезона рубки								
Летняя рубка								
0,224	2,124	0,096	0,336	0,096	0,004			
Зимняя рубка								
0,984	0,6	0,06	0,072	0,04		0,076	0,128	0,02

Определено, что за 20-летний период лесовозобновление на вырубках представлено в большей степени лиственными породами порослевого происхождения. На летней вырубке прослеживается положительная динамика порослевого возобновления вяза – 2,124 тыс. экз./га и клена семенного происхождения – 0,336 тыс. экз./га. На зимней вырубке преобладает липа порослевая – 0,984 тыс. экз./га, семенные экземпляры представлены ивой козьей – 0,128 тыс. экз./га и березой – 0,076 тыс. экз./га.

Выявлено, что образование поросли и последующий ее рост зависит от сезона рубки древостоя. При рубке в зимний период поросль формируется с весны, к осени успевает одревеснеть. При летней рубке к заморозкам поросль, не успев одревеснеть, погибает (Мартынова, Султанова, 2013; 2014; 2015; Гибадуллин, 2014).

За годы учета произошло численное уменьшение подроста: на зимней рубке с 41,9 (учет 1995 года) до 1926 тыс. шт.га$^{-1}$ (учет 2013 года); на летней рубке – с 8,1 до 2,880 тыс.штга$^{-1}$ (табл. 4).

Таблица 4

Изменение среднего количества поросли в гнезде

Сезон рубки	Среднее количество побегов в гнезде поросли, шт.		
	1995	2001	2013
Летняя	0	4,3	3,5
Зимняя	71,0	10,5	6,0

Выводы:

1. Подрост липы мелколистной последующей возрастной генерации, сформированный на участке зимнего сезона сплошной узколесосечной рубки, превосходит по показателям подрост, сформированный на вырубке летнего сезона: на зимней вырубке количество ее вегетативного возобновления достигает 0,98 тыс. шт. га$^{-1}$, летней – 0,2 тыс. экз. га$^{-1}$.

2. Сезон проведения сплошной узколесосечной рубки в липовых лесах (лето, зима) определяет состав последующего возобновления: летняя вырубка характеризуется доминированием возобновления второстепенных древесных пород – клена остролистного и вяза шершавого, что свидетельствует о процессе смены главной породы; возобновление на участке зимней вырубки представлено порослевыми экземплярами липы последующей генерации, что позволит сохранить лесовыращивание коренной породы.

3. Состав подроста за 20-летний период наблюдений изменился незначительно, в составе подроста появились семенные экземпляры дуба (0,1 %) и березы (3,9 %).

4. Полнота древостоя выступает лимитирующим фактором развития подроста: при полноте 0,7 количество подроста составляет 1,79 тыс. шт./га, что в 2 раза меньше, чем в насаждении при полноте 0,5.

5. Анализ динамики подроста под пологом нетронутого рубкой древостоя свидетельствует об уменьшении количества подроста с увеличением возраста и полноты древостоя, а также о доминировании в составе клена остролистного, на долю которого приходится от 7 до 9 единиц состава.

Библиографический список

1. Алексеев, С.В. Выборочные рубки в лесах Севера / С.В.Алексеев, А.А. Молчанов. – М.: Изд-во АН СССР, 1954. – 147 с.

2. Алексеев, В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев / В.А. Алексеев // Лесоведение. – 1989. – №4. – С. 51–57.

3. Габделхаков, А.К. Эколого-лесоводственные основы формирования высокопродуктивных липняков / А.К. Габделхаков, К.М. Габдрахимов, С.И. Конашова, Р.Р. Султанова, А.Ф. Хайретдинов. – Уфа: БГАУ, 1998. – 189 с.

4. Гибадуллин, Н.Ф. Система рубок в липняках рекреационных лесов / Н.Ф. Гибадуллин, М.В. Мартынова, И.В. Игонин // Вестник Казанского ГАУ. – 2014. – № 2(32) – С. 108-113 .

5. Мартынова, М.В. Динамика возобновления леса на участках пройденных рубками в разные сезоны года / М.В. Мартынова // Наука молодых в инновационном развитии АПК. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. – С. 134-139.
6. Мартынова, М.В. Эффективность рубок липы мелколистной в лесах Башкирского Предуралья /М.В. Мартынова, Р.Р. Султанова // Перспективы инновационного развития АПК. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. – С. 184-190.
7. Мартынова, М.В. Система рубок в липняках Среднего Предуралья / М.В. Мартынова, Р.Р. Султанова, С.В. Мартынова// Аграрная наука в инновационном развитии АПК. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. – С. 233-242.
8. Мартынова, М.В. Лесовосстановление вырубок липы мелколистной в лесах Среднего Предуралья: автореф. дис… канд. с.-х. наук / М.В. Мартынова. – Уфа, 2015. – 20 с.
9. Рябцев, О.С. Рубки ухода в естественно формирующихся насаждениях после сплошных рубок в зоне южной тайги европейской части России / О.С. Рябцев // Лесохозяйственная информация. – 2013. – № 1. – С. 1-6.
10. Соколов, П.А. Особенности строения семенных и порослевых липняков / П.А. Соколов // Лесная таксация и лесоустройство. – Красноярск: КПИ, 1983. – С. 75-78.
11. Сукачев, В.Н. Дендрология с основами лесной геоботаники /В.Н. Сукачев. – М.-Л.: Гослесбумиздат, – 1965. – 614 с.
12. Султанова, Р.Р. Лесоводственные методы формирования высокопродуктивных липняков на Южном Урале: автореф. дис... док. с.-х. наук / Р.Р.Султанова. – Уфа, 2006. – 40 с.
13. Kubner, R. Mortality patterns of Quercus, Tilia and Fraxinus germinants in a floodplain forest on the river Elbe, Germany / R. Kubner // Forest Ecology and Management. – 2003. – № 173. – P. 37-48.
14. Coates, K. D. Tree recruitment in gaps of various size, clearcuts and undisturbed mixed forest of interior British Columbia, Canada / K. D. Coates // Forest Ecology and Management. – 2002. – №155. – P. 387-398.
15. Sokolov, P.A. Estimation of crown biomass in the lime stands of the European part of Russia / P.A. Sokolov, E.A. Kurbanov // Forestry. – 2003. – Vol. 72. – № 1. – P. 75-77.
16. Taylor, S.O. Loss of oak dominance in dry-mesic deciduous forests predicted by gap capture methods / S.O. Taylor, C.G. Lorimer // Plant ecology. – 2003. – № 167. – P. 71-88.

УДК 630.232.22

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ИСКЛЮЧЕННЫХ ИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ЗЕМЕЛЬ СОЗДАНИЕМ ПЛАНТАЦИЙ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

Т.В. Нуреева[1], Е.М. Романов[1], А.А. Белоусов[2], А.В. Ушнурцев[1]
[1]Поволжский государственный технологический университет
[2]Немское лесничество Кировской области

Выращивание лесных плантаций в рамках организации агролесоводственных хозяйств позволит восстановить биологическую продуктивность постагрогенных земель, использовать углерододепонирующий потенциал лесов и развивать производство возобновляемых источников энергии. В статье приводятся материалы исследований влияния способов основной обработки почвы и вида посадочного места на приживаемость и рост плантаций сосны обыкновенной на неиспользуемых сельскохозяйственных землях. Доказано переуплотнение пахотного слоя дерново-подзолистой почвы после длительного сельскохозяйственного производства на глубине 0-20 см по сравнению с почвой под лесным насаждением. Плотность почвы закономерно снижается после ее обработки, кроме посадки в дно борозды плуга ПКЛ-70, где отмечены самые высокие значения данного показателя. Вид обработки почвы влияет на видовой состав и проективное покрытые посадочных мест травянистой растительностью, в меньшей степени зарастают борозды и отвалы, подготовленные лесным плугом ПКЛ-70. Приведены доказательства, что на начальных этапах культуры сосны растут интенсивнее, выше их приживаемость и сохранность на участках со сплошной и бороздной обработкой с посадкой в микроповышения. При обработке бороздами уменьшаются видовой состав и проективное покрытие сорной травянистой растительности, что обеспечивает условия для ускоренного выращивания сосны. На пятый год после посадки отмечается тенденция снижения показателей роста при посадке сосны в дно борозды. Обоснована возможность создания агролесоводственных хозяйств с посадкой план-

таций сосны на деградированных, исключенных из сельскохозяйственного пользования землях, за счет чего обеспечивается восстановление их биологической продуктивности.

Ключевые слова: *обработка почвы, неиспользуемые сельскохозяйственные земли, лесные плантации, сосна обыкновенная*

THE PRODUCTIVITY RECONSTRUCTION OF THE SUSPENDER FROM THE AGRICULTURAL USE DEGRADED LANDS BY CREATING ARTIFICIAL FORESTS OF SCOTS PINE

T.V. Nureeva[1], E.M. Romanov[1], A.A. Belousov[2], A.V. Ushnurtsev[1]
[1]Volga State University of Technology
[2]Nemsky forest district of the Kirov region

As a part of agricultural forestry organization the cultivation of artificial forest plantations will allow to reconstruct the biological productivity of post agrogenic lands, to use carbon deposit forest potential and to develop production of renewable energy sources. The article presents the research materials of the influence of basic ground cultivation methods and the type of planting point on survival ability and growth of the Scots pine plantations on unused farming land. It is proved that the ploughed horizon of derno podzolic soil after the longstanding agricultural productivity on the depth of 20 cm becomes over consolidated in comparison with the soil under the forest stands. The soil density consistently declines after its cultivation, exept the plantingof plough ПКЛ-70 in furrow bottom, where the highest values of the soil density were marked. The type of soil cultivation influences the species composition and the projective cover of planting point by grassland vegetation. The furrows and earthboards prepared with the forest plough ПКЛ-70 grow over in a less degree. It is proved that on the initial stages the crop of Scots pine demonstrates more intensive growth, their survival ability and preservation on the lots of microhill planting with complete and furrow cultivation are higher. While furrow cultivation the species composition and the projective cover of weed vegetation are reducing, and this provides conditions for accelerated Scots pine growth. On the 5-th year after planting there is a tendency of growth indicators reduction in pine planting in the furrow bottom. There is reasonable opportunity of establishing agricultural forestry on the degraded lands suspender from agricultural use with the Scots Pine planting, due to that the reconstruction of their bioproductivity would be provided.

Keywords: *tillage, unused agricultural land, forest plantations, Scots Pine*

Введение. Увеличение объемов и продуктивности фотосинтеза на планете (в т.ч. за счет восстановления и посадки новых лесов) обеспечит оздоровление биосферы, повышение интенсивности стоков CO_2 из атмосферы (Курбанов, 2007; П.М. Канило и др., 2013; Замолодчиков и др., 2013). Для создания новых лесов целесообразно вовлекать непродуцирующие, выведенные вследствие значительного снижения плодородия и удаленности от населенных пунктов из сельскохозяйственного пользования земли с их переводом в категорию продуцирующих и экологически полезных объектов (Курбанов и др., 2008). Наиболее приемлемым способом использования вышеуказанных земель является лесовыращивание (Шутов, Жигунов, 2013; Домасевич, Якимов, 2008; Романов и др., 2016). Эффективным способом использования пустующих низкоплодородных земель с длительным сельскохозяйственным пользованием, на наш взгляд, является создание агролесоводственных хозяйств (Romanov et all., 2016). Выращивание лесных насаждений, плантаций и сельскохозяйственных растений позволит восстановить биологическую продуктивность постагрогенных земель, использовать углерододепонирующий потенциал лесов и развивать производство возобновляемых источников энергии. Для условий России, по мнению Шутова и Жигунова, следует на пустующих сельскохозяйственных землях ориентироваться на получение древесины хвойных пород – ели европейской и сосны обыкновенной (Шутов, Жигунов, 2013).

В Нечерноземной зоне страны значительные площади выведенных из аграрного производства земель находятся на дерново-подзолистых почвах, отличающихся низким содержанием гумуса, кислой реакцией среды и слабой оструктуренностью. Эти разновидности почв требуют постоянного вложения энергетических средств и экономических инвестиций, без которых быстро утрачивают благоприятные для возделывания сельскохозяйственных культур режимы и свойства (Никитин,1986). Одним из важнейших факторов деградации физического состояния почвенного покрова и снижения его плодородия является переуплотнение почв сельскохозяйственной техникой (Гордеев и др., 2008).По экспертной оценке специалистов, среди пахотных дерново-подзолистых и серых лесных почв преобладают почвы слабой и средней степени деградации по физическим свойствам. Снизить негативное влияние переуплотнения почвы на растения возможно применением способа обработки почвы, с помощью которого можно управлять ростом древесных растений. Вопрос лесовыращивания на старопахотных землях плантационных культур сосны, ели, березы и здоровой осины высокой производительности с коротким, до 50 лет, оборотом рубки решался и в ряде зарубежных стран, в частности в Финляндии, причем эффективность посадки леса бывших сельскохозяйственных земель была высокой (Niskonen, 1999, Eriksson, 2006).

Цель работы – доказать целесообразность создания лесных плантаций сосны обыкновенной и выявить эффективные виды обработки почвы, обеспечивающие повышение биологической продуктивности деградированных, выведенных из аграрного производства земель.

Объект и методика исследований. Для выполнения поставленной цели был заложен эксперимент в Немском районе Кировской области. На исключенных из сельскохозяйственного пользования землях были созданы сосны целевого назначения с применением различных видов обработки почвы, в т.ч. сплошной плугом ПЛН-3-35, рыхлителем «KRONE» немецкого производства, нарезки борозд лесным плугом ПКЛ-70 с посадкой сеянцев в дно борозды и в отвал. Дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы постагрогенных земель характеризовались содержанием гумуса – от 1,6 до 2,6%, фосфора – 2,0 и калия – 38,2-66,4 мг/100 г почвы, pH- от 5,1 до 6,1.

Результаты. Дисперсионным анализом ($НСР_{05}$=0,11 и 0,16) было доказано переуплотнение пахотного слоя дерново-подзолистой почвы после длительного сельскохозяйственного пользования на 0,42 и 0,51 г/см^{3}на глубине 0-10 и 10-20 см по сравнению с почвой под лесным насаждением (рис.1).

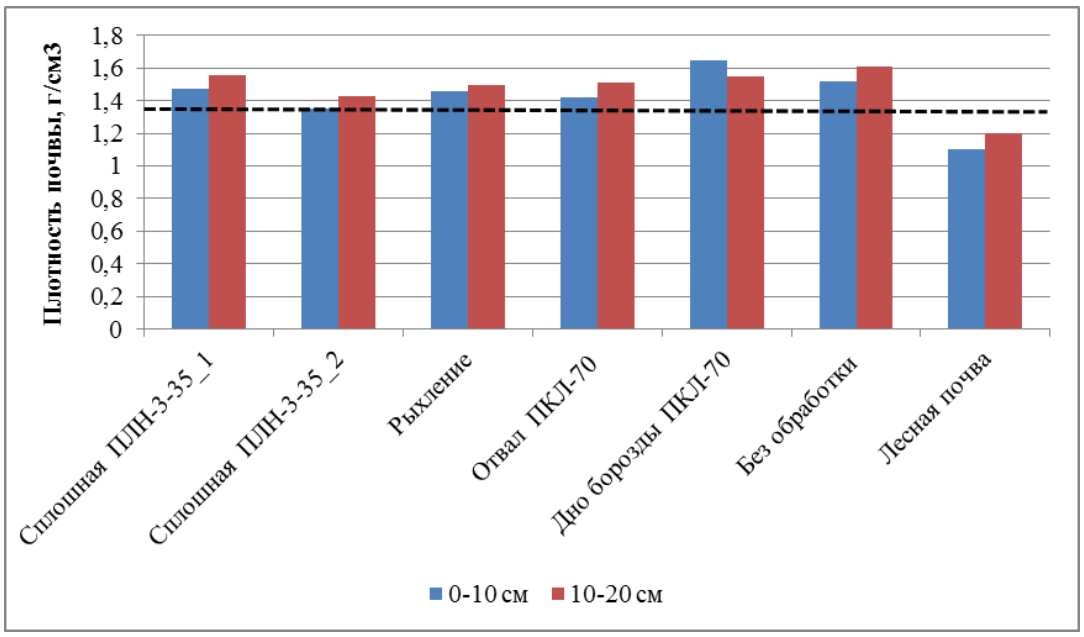


Рис. 1. Влияние вида обработки на плотность почвы спустя 5 лет

Согласно шкале оценки степени деградации почв по их плотности (Гордеев и др., 2008), исследованный участок характеризовался сильной степенью деградации (пунктирной линией показан нижний предел деградации почв). Спустя 5 лет после обработки произошло достоверное снижение равновесной плотности верхнего 10-см слоя почвы на участках со сплошной обработкой плугом ПЛН-3-35, рыхлителем «KRONE» и в отвалах лесного плуга ПКЛ-70, что позволило отнести данные участки к категории со средней и слабой деградацией. Дно борозды, образованной плугом ПКЛ-70, оказалось на уровне так называемой «плужной подошвы», самого уплотненного горизонта, с плотностью 1,6 г/см^3. Его наличие на почвах с длительным сельскохозяйственным пользованием подтверждается в работах В.В. Медведева (2011).

Один из рисков при выращивании лесных плантаций на исключённых из сельскохозяйственного пользования землях связан с развитием травяного покрова, который, затеняя культивируемую породу, может существенно снизить приживаемость и прирост лесных культур сосны в первые годы.

Результаты исследований показали, что вид обработки почвы влияет на проективное покрытые травянистой растительностью, причем в меньшей степени зарастают борозды и отвалы, подготовленные лесным плугом ПКЛ-70 (табл.1). На данных участках в видовом составе травянистой растительности преобладают растения семейства сложноцветных, не встречаются растения семейства хвощевых и отсутствуют такие вредоносные сорняки, как злаковые. Снижение конкуренции молодых растений сосны с травянистой растительностью в посадочных местах, образованных лесным плугом, дает основание рекомендовать его при создании плантаций на землях, вышедших из-под сельхозпользования.

Таблица 1

Видовое разнообразие травянистой растительности в зависимости от обработки почвы

Вариант обработки почвы	Общее число видов	Количество видов по семействам, шт. м^2					Проективное покрытые,%
		сложноцветные	злаковые	бобовые	хвощевые	иные	
Без обработки	30	11	7	2	2	8	59,1
Сплошная обработка почвы МТЗ-82+ПЛН 3-35	29	11	7	1	2	8	58,9
Обработка почвы Т-150 + рыхлитель «KRONE»	27	10	5	2	2	8	68,6
Бороздная обработка почвы посадка ДТ-75 + ПКЛ-70 (посадка в дно борозды)	15	9	2	2	0	2	34,0
Бороздная обработка почвы ДТ-75 + ПКЛ-70 (посадка в отвал)	13	7	3	1	0	2	32,4

Регулирование видового состава и проективного покрытия травянистой растительностью – одно из условий, обеспечивающих ускоренное выращивание культур сосны на начальных этапах роста. Результатами исследований выявлено, что в образованных плугом ПКЛ-70 бороздах в 2 и более раз снизилось проективное покрытие и видовое разнообразие представленных на сельскохозяйственных землях сорных растений. Учитывая высокое, более 58% проективное покрытие на участках со сплошной обработкой и рыхлением «KRONE», следует рекомендовать перед созданием лесных плантаций сосны содержание участка под чёрным паром в течение как минимум 1 года либо проектировать ежегодно не менее 3 агротехнических уходов, включая скашивание травы в междурядьях до периода достижения высоты целевой породы, превышающей травяной покров.

Правильно выбранный способ обработки почвы – одно из условий высокой приживаемости культур и хорошего их роста на основе взаимной стимуляции ростовых процессов асси-

миляционного аппарата и корневых систем. Приживаемость в первый год, как один из показателей создания благоприятных условий для культивируемой породы в посадочных местах, оказалась высокой на всех экспериментальных участках с колебаниями от 93,7% при рыхлении почвы орудием «KRONE» до 96,7% при посадке сосны обыкновенной в дно борозды, образованной плугом ПКЛ-70 (табл. 2).

Таблица 2

Влияние способов обработки почвы на приживаемость культур сосны обыкновенной (Pínus sylvéstris)

Варианты обработки почвы	Среднее значение приживаемости по годам, %			
	2009	2011	2012	2013
Бороздная обработка почвы ДТ-75 + ПКЛ-70 (посадка в дно борозды)	96,7	95,3	94,7	89,7
Бороздная обработка почвы ДТ-75 + ПКЛ-70 (в отвал)	95,0	93,6	92,7	75,8
Сплошная обработка почвы МТЗ-82+ ПЛН 3-35	95,3	94,3	92,0	78,1
Сплошная обработка почвы Т-150+«KRONE»	93,7	93,0	90	62,1
$F_{расч}$	9,4	2,97	16,67	29,4
$НСР_{05}$	1,53	1,88	1,54	6,8

Примечание: F таб=3,48

В первый год после посадки имеются хотя и незначительные, но достоверные различия в приживаемости культур на участках с различными способами обработки почвы (Fрасч. ‹ Fтабл.) В последующие четыре года отпад оказался неравномерным и составил от 10,3% при посадке в борозды до 37,9% при обработке рыхлителем «KRONE». Разница в приживаемости сосны при различных способах обработки оказалась достоверной с увеличением Fрасч. от 9,4 в первый год посадки до 29,4 на четвёртый год, что свидетельствует об увеличении влияния фактора на изучаемый признак. Увеличение количества отпада связано с различиями в микроклиматических условиях посадочного места и степенью его зарастания травянистой растительностью. Согласно результатам наших исследований, самой высокой площадью проективного покрытия растительностью отличается вариант со сплошной обработкой почвы плугом ПЛН-3-35 и рыхлителем «KRONE».

Биометрические параметры древесных растений отражают их реакцию на условия произрастания, на начальных этапах роста большое влияние оказывают микроклиматические условия в посадочном месте. Так, снижение интенсивности роста на 5-й год наблюдается у сосны обыкновенной в бороздах, образованных плугом ПКЛ-70, и при сплошной обработке рыхлителем «KRONE» (табл.3).

Таблица 3

Влияние вида посадочного места и применяемых почвообрабатывающих орудий на биометрические показатели культур сосны обыкновенной (Pínus sylvéstris)

Вариант обработки почвы	Биометрические показатели культур сосны обыкновенной за 5-летний период							
	Высота, см				Диаметр, мм			
	2009	2011	2012	2013	2009	2011	2012	2013
Бороздная ДТ-75+ПКЛ 70 (посадка в дно борозды)	13,8	27,4	53,6	66,3	4,8	5,5	12,0	13,1
Бороздная ДТ-75+ПКЛ 70 (посадка в микроповышение)	11,5	22,0	52,8	81,9	4,4	5,2	11,6	15,7
Сплошная МТЗ-82+ ПЛН-3-35	12,4	26,7	56,2	83,8	4,1	5,5	12,4	17,3
Сплошная Т-150+рыхлитель «KRONE»	7,8	17,6	39,5	70,8	4,1	4,8	8,7	15,9
F факт.($F таб_{05}$ =4,08)	9,4	2,97	16,67	29,4	18,6	27,8	25,6	3,13
$НСР_{05}$	1,53	1,88	1,54	6,8	0,22	0,20	1,07	3,21

У сосны, высаженной в дно борозды, следует отметить существенное по сравнению с остальными вариантами снижение приростов по диаметру на пятый год. Это подтверждается относительными показателями диаметра, который у сосны обыкновенной в данном варианте снижен, начиная с третьего года выращивания (рис. 2).

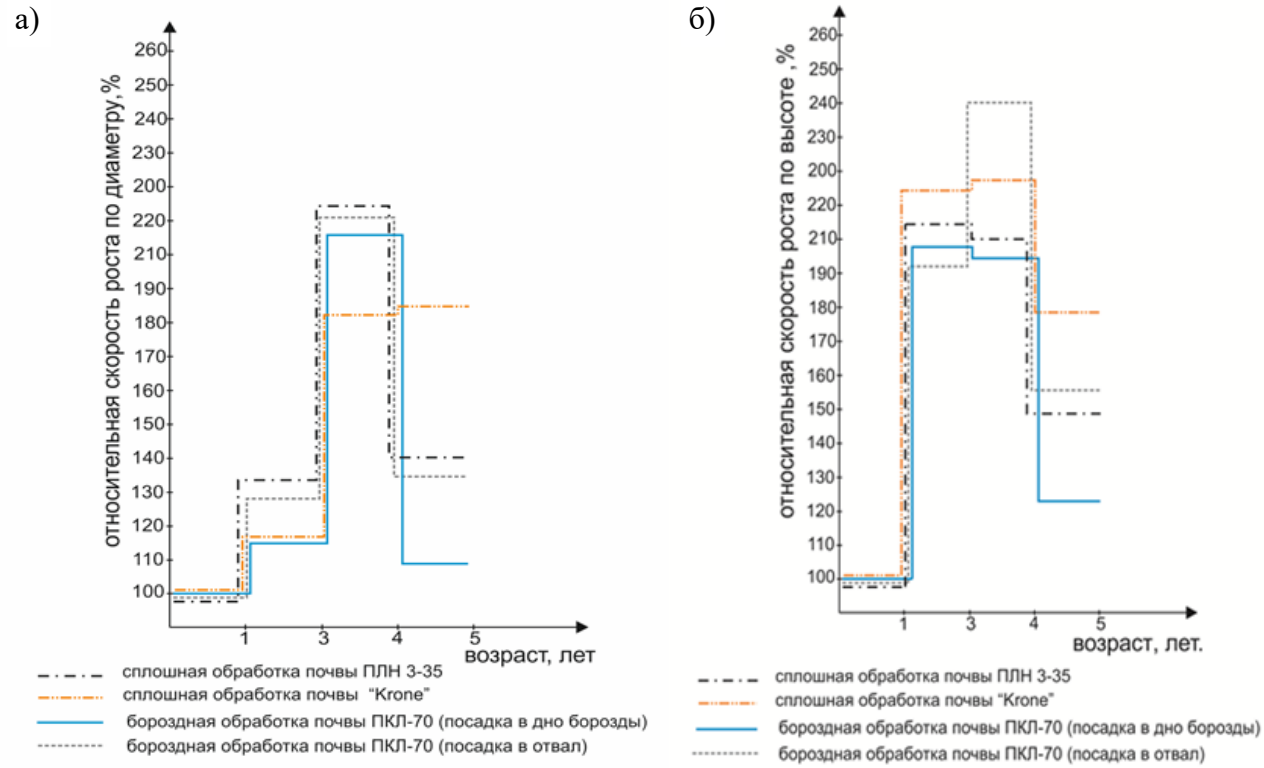


Рис.2. Относительная скорость роста по высоте (а) и диаметру (б) сосны обыкновенной за 5-летний период при различных способах обработки почвы и формирования посадочного места.

Отмечается тенденция увеличения относительной скорости роста в вариантах с посадкой в отвал, образованной плугом ПКЛ-70, со сплошной обработкой и с рыхлением «KRONE». Это дает основание сделать вывод о создании благоприятных условий с обеспечением интенсивного роста сосны обыкновенной в первые годы на участках с посадкой в отвал, образованный лесным плугом ПКЛ -70 и после сплошной обработки плугом ПЛН-3-35.

Выводы. Вовлечение в хозяйственный оборот земель, существенно снизивших свое плодородие в результате длительного сельскохозяйственного пользования, возможно путем организации агролесоводственных хозяйств и создания лесных культур целевого назначения. Создание новых лесов и ведение сельского хозяйства на исключенных из аграрного производства землях будет способствовать оздоровлению биосферы, повышению интенсивности стоков CO_2 из атмосферы и восстановлению биопродуктивности пустующих земель.

Вид обработки почвы определяет интенсивность роста культур в первые годы, поскольку способствует снижению плотности почвы, степени зарастания сорной травянистой растительностью и формированию благоприятного микроклимата в посадочных местах. Оптимальные почвенно-экологические условия для интенсивного роста сосны обыкновенной обеспечиваются при использовании плуга общего назначения ПЛН-3-35 и лесного ПКЛ-70 с посадкой древесных растений в отвал. Это подтверждается более высокими темпами роста сосны обыкновенной до пятилетнего возраста в высоту и по диаметру. Мониторинг культур будет продолжен.

Библиографический список

1. Домасевич, А.А. Экономическая эффективность выращивания лесных культур разных пород на бывших сельскохозяйственных землях / А.А. Домасевич, Н.И. Якимов // Труды Белорусского государственного техно-

логического университета. Лесное хозяйство. – 2008. – №1. – С. 211-213. – URL: http://elibrary.ru/item.asp?id=25100435.

2. Замолодчиков, Д.Г. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации в 1990-2050 гг.: ретроспективная оценка и прогноз / Д. Г. Замолодчиков, В. И. Грабовский, Г. Н. Коровин и др. // Метеорология и гидрология. – 2013. – №10. – С. 73-93.

3. Канило, П.М. Антропогенно-экологические факторы глобального потепления климата / П.М. Канило, В.В. Соловей, М.В. Сарапина // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2013. – №8(14). –С. 53-60. – URL: http://elibrary.ru/download/33774087.pdf.

4. Курбанов, Э.А. К вопросу об углерододепонирующих насаждениях / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьёв, Л.С. Мошкина и др. // Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – №3 – 2008. – С. 5-17.

5. Курбанов, Э.А. Углерододепонирующие насаждения Киотского протокола / Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. – 184 с.

6. Медведев, В.В. Физические свойства и характер залегания плужной подошвы в разных типах пахотных почв / В.В. Медведев // Почвоведение. – 2011. – №12. – С. 1487-1495.

7. Никитин, Б.А. Окультуривание пахотных почв Нечерноземья и регулирование их плодородия / Б.А. Никитин. – Л.: Агропромиздат, 1986. – 280 с.

8. Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России / под редакцией академиков Россельхозакадемии А.В. Гордеева, Г.А. Романенко. – М.: Росинформагротех, 2008. – 67 с. – URL: http://agro.geonet.ru/publications/degradation.pdf.

9. Романов, Е.М. Развитие агролесоводства как путь повышения эффективности землепользования / Е.М. Романов, Т.В. Нуреева, А.А. Белоусов // Вестник Российской академии наук. – 2016. – №8 (Том 86). – С.728-734.

10. Шутов, И.В. Проблемы получения древесного сырья на неиспользуемых сельскохозяйственных землях / И.В. Шутов, А.В. Жигунов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – Йошкар-Ола, 2013. – № 4. – С. 5-17.

11. Eriksson, E. Effects of rotation period on biomass production and atmospheric CO2 emissions from broadleaved stands growing on abandoned farmland / E. Eriksson, T. Johansson // Silva fennica. – 2006. – № 40 (4). – P. 603-613.

12. Niskonen, A. The financial and economic profitability of field afforestation in Finland / A. Niskonen // Silva Fennica. – 1999. – 33 (2). – P. 145-157.

13. Romanov, E.M. Development of agroforestry as a way to improve land use / E.M. Romanov, T.V. Nureeva, A. A. Belousov // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2016/ – Vol. 86. – P. 337–342. – URL: http://link.springer.com/article/10.1134/S1019331616040110.

УДК 630*58

ДВА ДЕСЯТИЛЕТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПО MODIS

Э.А. Курбанов
Поволжский государственный технологический университет

В последние годы исследование глобальной и региональной динамики наземных экосистем невозможно представить без использования многолетних геопространственных спутниковых изображений, получаемых с различных спектрорадиометров. Актуальность таких исследований также обуславливается подписанием мировым сообществом в рамках конвенции ООН по изменению климата новых обязательств по снижению углекислого газа в атмосфере с 2020 г. Большая роль в этом документе отводится лесным экосистемам, депонирующим значительные запасы углерода в своей биомассе. В работе представлен анализ зарубежных и отечественных литературных источников применения мультиспектральных данных MODIS при проведении научных исследований в области оценки и мониторинга растительного покрова Земли. Обзор публикаций позволил объединить все существующие разработки ученых, использующих данные спектрорадиометра MODIS, в следующие основополагающие направления: глобальное тематическое картирование растительного покрова; оценка и картирование биомассы (углерода) лесных насаждений; мониторинг нарушений лесных насаждений; моделирование динамики экосистем с учетом меняющегося климата. Приведенные в статье направления исследований могут иметь принципиально новые возможности для повышения точности мониторинга лесов и решения других прикладных задач по оценке лесного покрова Российской Федерации на региональном и национальном уровнях. Анализ литературы свидетельствует также о том, что одним из недостатков MODIS по сравнению с данными других спутников является его низкое пространственное разрешение.

В долгосрочной перспективе для точного и оперативного мониторинга состояния лесных насаждений потребуются данные с нескольких спектрорадиометров, что позволит объединить преимущества их спектральных, временных и пространственных разрешений. Это будет особенно актуально при использовании данных MODIS с отечественными спутниковыми системами Ресурс и Канопус.

Ключевые слова: *спутниковые снимки, MODIS, растительный покров, лесные насаждения, биологическая продуктивность, смена землепользования*

TWO DECADES OF VEGETATION COVER RESEARCH WITH THE USE OF MODIS

E. Kurbanov
Volga State University of Technology

During the last years it is difficult to imagine the studies of global and local dynamics of terrestrial ecosystems without the use of multitemporal geo-spatio satellite images from different spectroradiometers. The relevance of such studies is also caused by signing of international community under the UN Convention of Climate Change of new obligations on mitigation of CO_2 emissions to the atmosphere from 2020. A major role in this document is given to the forest ecosystems, sequestering huge stocks of carbon in biomass. The analysis of foreign and domestic literature on the application of multispectral MODIS data under research in the area of assessment and monitoring of the vegetation cover was carried out. The review of publications allowed combining all existing research activities, using the MODIS spectroradiometer data, in the following basic directions: global maps of land cover, assessment and mapping of biomass (carbon) in forest ecosystems, monitoring of forest disturbances, modeling of ecosystem dynamics in view of the changing climate. These areas of research may have fundamentally new opportunities for improving the accuracy of forests monitoring and for the solutions of other applications for estimation of forest cover of the Russian Federation at the regional and national level. Analysis of scientific literature also indicates that one of MODIS disadvantages compared with the data of other satellites is its low spatial resolution. In the long term run, for the precise and efficient monitoring on the conditions of forest ecosystems there will be need in data from multiple spectroradiometers, which will combine the advantages of spectral, temporal and spatial resolutions. This is especially true when using MODIS data with the Russian satellites Resource and Canopus.

Keywords*: satellite images, MODIS, vegetation cover, forest stands, biological productivity, and land use change*

Введение

Мультиспектральные спутниковые данные являются важным материалом для проведения оперативного дистанционного мониторинга наземного покрова на глобальном и региональном уровнях (Барталев и др., 2015; Loboda et al., 2016). В последние годы при таком мониторинге и научных исследованиях широкое применение находят спутниковые снимки высокого и среднего пространственного разрешения (Воробьев, Курбанов, 2014; Курбанов и др., 2014). Тем не менее, для широкомасштабных региональных исследований динамики растительного покрова требуется большое число спутниковых сцен, а их подбор, обработка и дешифрирование занимают много времени и требуют существенных финансовых затрат.

Спектрорадиометр MODIS (Moderate resolution imaging spectroradiometer) NASA (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США), расположенный на борту спутников Terra/Aqua, предоставляет данные с 2000 года в 36 спектральных каналах с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах (0,4-14,4 мкм) с пространственным разрешением от 250 м (MODIS.., 2016). Спутниковые сцены этого прибора распространяются Геологической службой США (USGS).

С 2001 г. при поддержке NASA производится ежегодное обновление карт глобального наземного покрова, полученных по данным группы из 5 продуктов наземного покрова MODIS (MCD12Q1) (Friedl et al, 2010). Эти карты предоставляют важную информацию для разработки других данных наземного покрова, например MODIS NPP/GPP (Net Primary Productivity / Gross Primary Productivity) или LAI/FPAR (Leaf Area Index/ Fraction of Photosynthetically Active Radiation) (Running et al, 2004). Комплекс 5 продуктов (MCD12Q1) также нашел широкое применение при оценках на глобальном и региональном уровнях, включая изучение динамики землепользования и наземного покрова, первичную продуктивность и моделирование экосистем, гидрологическое моделирование, атмосферной химии, изменения климата, взаимодействие человека и окружающей среды (Cai et al., 2014).

Степень покрытия территории и временное разрешение (периодичность возврата спутника) каждые сутки делают MODIS уникальным инструментом для проведения оперативного мониторинга состояния атмосферы, водных бассейнов, растительного покрова и моделирования его глобальной динамики широким кругом специалистов во всем мире. Спектрорадиометр MODIS обладает улучшенными спектральными, пространственными, геометрическими и радиометрическими характеристиками, что позволяет обеспечивать принципиально новые возможности для тематического картирования наземного покрова и мониторинга лесных пожаров (Pouliot et al., 2014; Курбанов и др., 2016).

Целью работы является обзор научных исследований растительного покрова по спутниковым изображениям спектрорадиометра MODIS и выявление основных научно-практических направлений их применения в мониторинге лесов на региональном и национальном уровнях.

В работе использованы зарубежные и отечественные научные публикации по исследованиям растительного покрова Земли с применением MODIS за период с 2000 по 2016 гг. Большинство из них находится в электронном виде на сайтах научных журналов и в библиографических базах данных.

Результаты исследований

Анализ публикаций позволил сделать вывод о том, что все существующие разработки ученых, использующих данные MODIS для изучения растительного покрова, можно объединить в следующие основные направления: глобальное тематическое картирование наземного покрова; оценка и картирование биомассы (углерода) лесных насаждений; оценка и картирование нарушений лесных насаждений; моделирование динамики экосистем.

Рабочая группа NASA MODIS выпустила глобальную тематическую карту наземного покрова с пространственным разрешением 1 км (Friedl et al., 2002), отражающую динамику растительного покрова (phenology) и процент покрытия земной поверхности древесным пологом (VCF) (Hansen et al., 2003). При создании глобальной карты рабочая группа использовала несколько систем классификации, основанных преимущественно на методике IGBP Geosphere–Biosphere Programme) (IGBP, 1990). В этих исследованиях управляемая классификация явилась основным методом для обработки глобальных данных MODIS. В дополнение к классу IGBP для каждого пикселя полученная тематическая карта земного покрова MODIS обеспечила несколько дополнительных параметров, включающих оценку точности классификации по маркерам IGBP и прогнозирование наиболее вероятного альтернативного класса. Полученные результаты на основе мультивременных данных (5 месяцев) MODIS прошли сравнение с данными тематических карт, полученных на основе AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) системы спутников NOAA и Landsat TM. Визуальный анализ показывает существенные различия между этими тематическими изображениями наземного покрова (Курбанов и др., 2015). Очевидно (см. рис. 1), что снимки MODIS демонстрируют более высокую пространственную детализацию наземных объектов на тематической карте

тихоокеанского побережья северо-запада США, чем данные AVHRR. Эти различия особенно проявляются в лесной и аридной зоне восточной части спутниковой сцены (рис. 1).

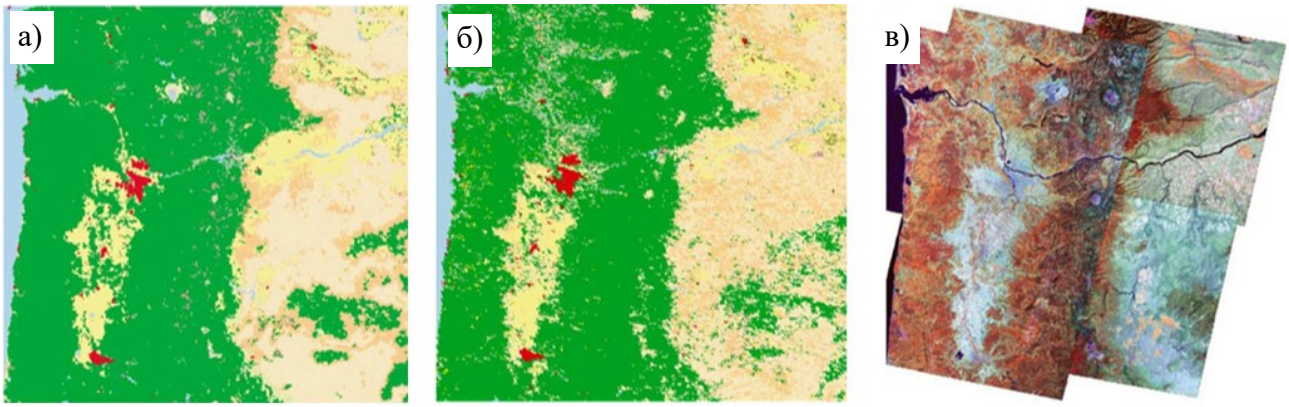


Рис. 1. Сравнение фрагментов глобальных тематических карт наземного покрова тихоокеанского побережья северо-запада США: а) по данным IGBP с 1 км разрешением данных AVHRR; б) данные MODIS, полученные между июлем и декабрем 2000; в) 4 спутниковые сцены Landsat TM

Другое исследование (Lunetta et al., 2006) рассматривает использование разновременного (16 дней) композита индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) спектрорадиометра MODIS для обеспечения автоматического выявления изменений в городских районах США. Точность распознавания снимков была выполнена с коэффициентом Каппа, равным 0,67. Основные результаты в оценке смены объектов наземного покрова получены для несельскохозяйственных земель. Авторы исследования показали в динамике, что за четыре года (2002-2005) по снимкам MODIS хорошо выделяются изменения в городской застройке – индивидуальное и дорожное строительство, появление торговых центров (рис. 2). Следует отметить, что изменения на рисунке 2 графически завышены приблизительно в 2,5 раза, потому что среднее изменение на площади каждого пикселя MODIS составило порядка 40%. На основании результатов проведённых исследований авторы утверждают, что пространственное разрешение данных MODIS NDVI 250 м существенно ограничивает их применение для целей мониторинга изменений в прибрежных зонах и на городских территориях, а также при оценке других экологических ресурсов, требующих более высокого разрешения.

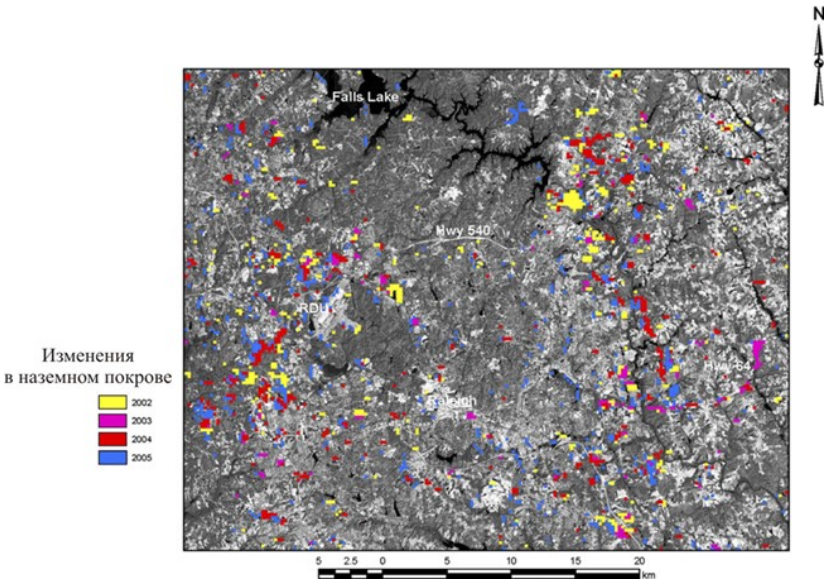


Рис. 2. Динамика ежегодных изменений наземного покрова городского района Рали в штате Северная Каролина (США) за период 2002-2005 г., полученная по спутниковым снимкам MODIS. Подстилающим изображением является панхроматический снимок Landsat ETM+ 1999 г. с пространственным разрешением 15 м

Американскими учеными (Gebremichael, Barros, 2006) проведена количественная оценка отклонений между данными наземных метеорологических станций и ВПП MODIS GPP (валовой первичной продуктивностью, Gross Primary Productivity). Данные по ВПП, доступные с временным разрешением 8 дней и пространственным разрешением 1 км, были исследованы на примере двух тропических экосистем: смешанных лесов влажных тропиков непальских Гималаев и открытых участков кустарников полузасушливого региона Мексики. Продукты MODIS GPP были сравнены с данными процессно-ориентированной биохимической и гидрологической модели, основанной на потоке данных метеорологических исследований. Результаты исследований показали, что при относительном согласии между моделями, наблюдается отклонение между данными MODIS GPP и наземными данными метеорологических станций: положительное отклонение для условий смешанных лесов и отрицательное – для открытых участков кустарников.

Скандинавские ученые использовали данные спектрорадиометра MODIS в комбинации с новыми методами картирования для региональных исследований тропических лесных ресурсов и динамики землепользования в Таиланде, Вьетнаме и Камбоджи (Tottrup et al., 2007). Ими применена управляемая модель принятия решений для картирования различных участков спелых и вторичных лесов, а также нелесных земель с использованием разновременных данных MODIS 250 пространственного разрешения (в качестве объясняющей переменной) и данных изображений высокого разрешения для моделирования зависимых переменных. На основании данных независимой валидации среднее значение абсолютного отклонения созданных тематических карт составило 14,6% для спелого леса, 21,6% для вторичного леса и 17,1% для нелесного покрова.

В работе американских ученых (Turner et al., 2006) приводятся результаты сравнения 9 участков, различающихся по типам биомов и землепользованию. К таким участкам относятся: арктическая тундра, бореальные леса, умеренные хвойные леса, тропические дождевые леса, травяные прерии, пустыня, луга и пахотные земли. Наземные данные по поверхности ВПП (GPP) и ежегодной чистой первичной продуктивности (NPP) были получены путем обработки данных модели углеродного цикла Biome-BGC в пространственно-распределенном виде. Входные параметры для модели по землепользованию и индексу листовой поверхности были получены по данным Landsat. Данные MODIS NPP and GPP не показали существенных отклонений. Между тем они имеют тенденцию к завышению данных на низкопродуктивных участках, что вызывается искусственно высокими значениями MODIS FPAR (fraction of photosynthetically active radiation absorbed by the canopy). В то же время данные MODIS имели тенденцию недооценки растительного покрова на высокопродуктивных участках. Все это, по мнению авторов (Turner et al., 2006) исследования, при проведении глобальных оценок требует более точной калибровки параметров алгоритма MODIS NPP/GPP.

Данные показателей индекса листовой поверхности (LAI) MODIS и вегетационного индекса были использованы для определения урожая сельскохозяйственных посадок кукурузы в штате Индиана (Fang et al., 2011). Для моделирования продуктивности кукурузы и оценки эффекта использования различных контрольных переменных в работе были использованы пять ассимиляционных схем: непосредственное использование LAI, EVI и NDVI и синергетические комбинации LAI, EVI или NDVI. Лучшие результаты и минимальное отклонение (3,5%) от данных департамента сельского хозяйства США показали данные моделирования, основанные на комбинированном использовании LAI, EVI и NDVI MODIS. Использование показателей только LAI, EVI и NDVI показало отклонение от данных департамента на 8,6%, 21% и 13%.

Данные MODIS Terra были использованы для классификации и оценки площадей сельскохозяйственных земель и посевов культур в различных регионах России (Барталев и др., 2005;

Савин и др., 2011). В работе приведены алгоритмы классификации, основанные на использовании разновременных спутниковых данных, а также априорные знания о закономерностях динамики сезонного развития различных сельскохозяйственных растений. Результаты оценки площадей сельскохозяйственный угодий показали существенное отклонение от данных государственной статистики. Для работы с полученной базой данных в ИКИ РАН разработан специализированный спутниковый сервис «Вега», который обеспечивает его пользователям возможность самостоятельно проводить оценки состояния сельскохозяйственных земель и оперативного мониторинга растительности для больших территорий (Лупян и др., 2011) .

В работе бразильских ученых проведена оценка влияния лесной фрагментации ландшафта Амазонии (Ferreira et al., 2010). Было выявлено нарушение ландшафта на территории 3,5 х 106 км^2 посредством простого пространственного определения количественных показателей (количества фрагментов, средней площади фрагмента и размера границ) и преобразования основной компоненты. Полученные данные были сравнены с сезонными данными MODIS NDVI и EVI. Кроме того, было установлено, что наибольшие нарушения наблюдаются в южной части Амазонии, где проводится интенсивная вырубка лесов, а также расположена сеть основных дорог. Существенная корреляция между сезонными данными NDVI и нарушением ландшафта выявлена на основе анализа параметров географически взвешенной регрессии (geographically weighted regression). Сезонные отклики EVI имели более сложный характер с существенными вариациями, полученными на нетронутых, слабо фрагментированных участках, что ограничивало возможность оценить происходящие нарушения. Авторы считают, что изменчивость нарушений объясняет 62% сезонной вариации значений NDVI. Подобное распределение наблюдается между прогнозируемыми и реальными сезонными данными NDVI (рис. 3). Другие исследователи также подтверждают высокую корреляцию между текстурой лесного полога и вегетационными индексами (Gamon et al., 1995; Oliveira-Filho and Fontes, 2000; Freitas et al., 2005).

Спутниковые данные NOAA/AVHRR и TERRA/MODIS за 1996-2009 гг. были использованы для картирования и сезонного мониторинга лесного покрова на трех ключевых участках, расположенных в Западном и Восточном Саяне (Пономарёв и др., 2011). В исследовании получена детальная характеристика горных лесных поясов и формаций в контексте их идентификации и изменения спектральных характеристик в течение периода вегетации. Отмечено, что высотно-

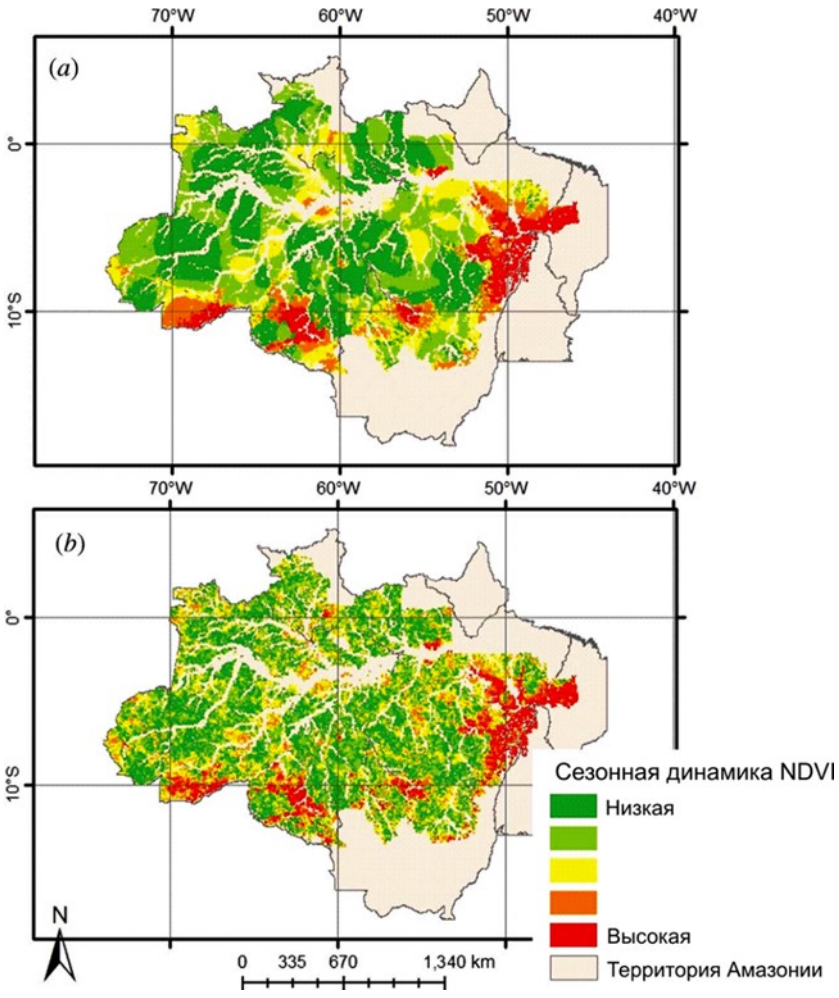


Рис. 3. Тематические карты фрагментированности лесов Амазонии, полученные при помощи: а) географически взвешенной регрессии, б) сезонных значений NDVI MODIS

поясная дифференциация может искажаться на температурных картах вследствие различного рода антропогенных воздействий, например, после проведения условно-сплошных вырубок на горных склонах.

Значительное количество исследований посвящено мониторингу гарей (Loboda et al., 2007) и оценке нарушений лесных насаждений с использованием снимков Landsat и MODIS. Исследование нарушений в лесном покрове Тихоокеанского побережья США по серии спутниковых снимков MODIS за 11-летний период был проведен коллективом авторов из Бостонского и Орегонского университетов (Sulla-Menashe et al., 2014). Для этого ими был использован алгоритм временной сегментации, полученный ранее для снимков Landsat для исследуемого региона. Сравнение снимков показало, что половина пикселей Landsat, отнесённых к нарушенным участкам, которые покрывали 5% одного пикселя MODIS, были корректно отнесены к нарушенным, включая 79% пикселей Landsat, которые покрывали третью часть одного пикселя MODIS.

Одним из наиболее распространённых направлений дистанционной оценки площадей гарей и степени повреждения растительного покрова после пожара является использование различных вегетационных индексов, полученных по разновременным снимкам спектрорадиометра MODIS. Многочисленными исследованиями была выявлена тесная корреляционная связь между показателями степени повреждения полога леса и значениями этих индексов вегетации. Нормализованный разностный индекс растительности NDVI часто используется исследователями при работе как с единовременными снимками, так и разновременными изображениями (до и после пожара) (Hudak et al., 2007; Leon et al., 2012). В последние годы также широкое применение находят композитный индекс гарей (CBI – Composite Burn Index) и нормализованный индекс гарей (NBR - Normalized Burn Ratio) (Esquin et al., 2008; Kasischke et al., 2008; Hoscilo et al., 2013; Воробьев и др., 2014). Оценка степени повреждения лесов пожарами по разновременным спутниковым снимкам MODIS на основе коротковолнового вегетационного индекса SWVI (short-wave vegetation index) предложена учеными Института космических исследований РАН (Барталев и др., 2012; Стыценко и др., 2013).

В научных публикациях также часто описываются исследования по разработке алгоритмов для дешифрирования (выявления) изменений в наземных экосистемах по серии снимков MODIS (Potapov et al., 2008; Roy et al., 2008; Mildrexler, 2009). Некоторые из этих алгоритмов разрабатываются для решения вопросов по изучению постпожарной динамики растительного покрова (Giglio et al., 2009; Loboda et al., 2011; Стыценко и др., 2013), другие - для оценки нарушенности лесного покрова, включая от насекомых и болезней (Spruce et al., 2011; Курбанов и др., 2015). Есть работы, использующие данные MODIS при оценке динамики сельскохозяйственных культур и их нарушений (McCarty et al., 2009; Hall et al., 2016). В то же время вопрос точности оценки нарушенности лесного покрова по снимкам MODIS с разрешением 500 м остается открытым (Frolking et al., 2009). Исследование сезонной фенологии лесов Северной Америки по данным MODIS показало, что границы между вегетационными периодами могут успешно выявляться через вегетационные индексы, несмотря на их прогнозную изменчивость в зависимости от местоположения и породного состава (Wu et al., 2014; Liu et al, 2016). При этом, в отличие от широко используемых индексов NDVI и EVI (Enhanced Vegetation Index), индексы, чувствительные к воде (например, LSWI - Land Surface Water Index), или менее зависимые от почв (например, OSAVI - Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index) также имеют большой потенциал в определении фенологических циклов лесов.

Заключение

Спектрорадиометр MODIS представляет собой уникальный ресурс геопространственных данных по наземному покрову, который активно используется учеными всего мира при оценках и моделировании растительного покрова как на глобальном, так и региональном

уровнях. Ретроспективные исследования многолетних данных MODIS также позволяют глубже понять процессы изменений в лесном покрове и его биологической продуктивности в условиях современного феномена меняющегося климата.

Анализ литературы по многочисленным направлениям использования данных MODIS в различных странах мира, представляющий собой обобщение значительного числа зарубежных и отечественных научных работ, свидетельствует о том, что они имеют большой потенциал при исследовании лесного покрова. Описанные в статье направления исследований по данным спектрорадиометра MODIS могут открывать принципиально новые возможности для повышения точности мониторинга лесов и решения других прикладных задач по оценкам лесного покрова Российской Федерации на региональном и национальном уровнях.

Тем не менее, анализ литературы также показывает, что одним из недостатков MODIS по сравнению с данными спутника Landsat является его низкое пространственное разрешение. В долгосрочной перспективе для точной и оперативной оценки нарушенности лесного покрова потребуются данные с различных спектрорадиометров, что позволит объединить преимущества их спектральных, временных и пространственных разрешений. Это будет особенно актуально при использовании в деятельности научных организаций и отраслевых министерств (департаментов) данных с отечественных спутников системы Ресурс и Канопус, занимающихся сбором информации по природным ресурсам России.

Работа выполнена по проекту № 2394 «Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем» в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации 2014-2016 гг.

Библиографический список

1. Барталев, С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 203-221.

2. 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 и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т.9. – № 2. – С. 9-26.

3. Барталев, С.А. Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS / С.А. Барталев, Е.А. Лупян, И.А. Нейштадт, И.Ю. Савин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: ИКИ РАН. –2005. – С. 228–236.

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

5. Воробьев, О.Н. Опыт применения снимков RapidEye для оценки недропользования в Республике Марий Эл / О.Н. Воробьёв, Э.А. Курбанов // Геоматика. – М.: «Совзонд». – 2014. – № 1. – С. 80-86.

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

7. 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.

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. – № 1 (13). – С. 36-48.

9. Лупян, Е.А. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности / Е.А. Лупян, И.Ю. Савин, С.А. Барталев и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: ИКИ РАН. – 2011. – № 1. – Т.8. – С. 190-198.

10.Пономарёв, Е.И. Спутниковый мониторинг горных лесных экосистем Саян / Е.И. Пономарёв, Д.М. Исмаилова, Д.И. Назимова // Journal of Siberian Federal University. Biology 1. – 2011. – № 4. – С. 75-85.

11.Савин, И.Ю. Спутниковый мониторинг воздействия засухи на растительность (на примере засухи 2010 года в России) / И.Ю. Савин, С.А. Барталев, Е.А. Лупян и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – С. 150-162.

12.Стыценко, Ф.В. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS / Ф.В. Стыценко, С.А. Барталев, В.А. Егоров, Е.А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – № 1. – С. 254-266.

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.Escuin, S. Fire Severity Assessment by Using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Derived from LANDSAT TM/ETM Images/ S. Escuin, R. Navarro, P. Fernandez // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – № 29 (4). – P. 1053-1073.

15.Fang, H. Integration of MODIS LAI and vegetation index products with the CSM-CERES-Maize model for corn yield estimation / H. Fang, S. Liang, G. Hoogenboom // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – № 32(4). – P. 1039-1065.

16.Ferreira, N.C. Assessing the response of the MODIS vegetation indices to landscape disturbance in the forested areas of the legal Brazilian Amazon/ N.C. Ferreira, L.G. Ferreira, A.R. Huete // International Journal of Remote Sensing. – 2010. – № 31 (3). – P. 745-759.

17.Freitas, S.R. Relationships between forest structure and vegetation indices in Atlantic rainforest / S.R. Freitas, M.C.S. Mello, C.B.M. Cruz // Forest Ecology and Management. – 2005. – № 218. – P. 353–362.

18.Friedl, M.A. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results / M.A. Friedl, D.K. McIver, J.C.F. Hodges et al. // Remote Sensing of Environment. – 2002. – № 83. – P. 287-302.

19.Friedl, M.A. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets / M.A. Friedl, D. Sulla-Menashe, B. Tan et al // Remote Sensing of Environment. – 2010. – Vol. 114. – P. 168-182.

20.Frolking, S. Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure / S. Frolking, M.W. Palace, D.B. Clark et al. // Journal of Geophysical Research. – 2009. – Vol. 114. – G00E02.

21.Gamon, J.A. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types / J.A. Gamon, C.B. Fiedl, M.L. Goulden et al. // Ecological Applications. – 1995. – №5. – P. 28-41.

22.Gebremichael, M. Evaluation of MODIS Gross Primary Productivity (GPP) in tropical monsoon regions / M. Gebremichael, A.P. Barros // Remote Sensing of Environment. – 2006. – № 100. – P. 150-166.

23.Giglio, L. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor / L. Giglio, T. Loboda, D.P. Roy, B. Quayle, C.O. Justice // Remote Sensing of Environment. – 2009. – № 113. – P. 408-420.

24.Hall, J.V. A MODIS-based burned area assessment for Russian croplands: Mapping requirements and challenges / J.V. Hall, T.V. Loboda, L. Giglio, G.W. McCarty // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 184. – P. 506-521

25.Hansen, M.C. Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm / M.C. Hansen, R.S. DeFries, J.R.G. Townshend et al. // Earth Interactions. – 2003. – № 7(10). – P. 1-15.

26.Hudak, A.T. The relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects / A.T. Hudak, P. Morgan, B.M.J. Smith et al. // Journal of Fire Ecology. – 2007. – Vol. 3. – № 1. – P. 64-90.

27.IGBP. International Geosphere-Biosphere Programme Data and Information Services [Electronic resource].– 1990. – URL: http://www.igbp.net. – 08.12.2016.

28.Kasischke, E.S. Evaluation of the composite burn index for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests / E.S. Kasischke, M.R.Turetsky, R.D. Ottmar et al. // International Journal of Wildland Fire. – 2008. – Vol. 17. – P. 515-526.

29.Liu, Y. Improved modeling of land surface phenology using MODIS land surface reflectance and temperature at evergreen needleleaf forests of central North America / Y. Liu, C. Wu, D. Peng et al. // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 176. – P. 152-162.

30.Leon, J.R.R. Using MODIS-NDVI for the Modeling of Post-Wildfire Vegetation Response as a Function of Environmental Conditions and Pre-Fire Restoration Treatments / R.R.J. Leon, W.J.D. van Leeuwen, G.M. Casady // Remote sensing. – 2012. – Vol. 4(3). – P. 598-621.

31.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 // in book “Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991”. Eds. G. Gutman, R. Volker. – 2016, Springer International Publishing. – P. 173-192.

32.Loboda, T. Regionally Adaptable Dnbr-Based Algorithm for Burned Area Mapping from MODIS Data / T. Loboda, K. J. O’Neal, I. Csiszar // Remote Sensing of Environment. – 2007. – № 109 (4). – P. 429-442.

33.Loboda, T.V. Mapping burned area in Alaska using MODIS data: a data limitations-driven modification to the regional burned area algorithm / T.V. Loboda, E.E. Hoy, L. Giglio, E.S. Kasischke // International Jourbnal of Wildland Fire. – 2011. – № 20. – P 487-496.

34.Lunetta, R.S. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data / R.S. Lunetta, F. Joseph Knight, J. Ediriwickrema, J.G. Lyon, L. Dorsey Worthy // Remote Sensing of Environment. – 2006. – № 105.– P. 142-154.

35.McCarty, J.L. The spatial and temporal distribution of crop residue burning in the contiguous United States / J.L. McCarty, S. Korontzi, C.O. Justice, T. Loboda // Science of the total environment. – 2009. – Vol. 407. – P. 5701-5712.

36.Mildrexler, D.J. Testing a MODIS global disturbance index across North America / D.J. Mildrexler, M. Zhao, S.W. Running // Remote Sensing of Environment. –2009. – № 113. – P. 2103–2117.

37.MODIS (or Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) [Electronic resource].– URL: https:// modis.gsfc.nasa.gov/about/ – 08.12.2016.

38.Oliveira-Filho, A. Patterns of floristic differentiation among Atlantic forests in southeastern Brazil, and the

influence of climate / A. Oliveira-Filho, M.A.L. Fontes // Biotropica. – 2000. – № 32. – P. 793–810.
39.Potapov, P. Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss / P. Potapov, M.C. Hansen, S.V. Stehman, T.R. Loveland, K. Pittman // Remote Sensing of Environment. – 2008. – № 112. – P. 3708–3719.
40.Pouliot, D. Development and assessment of a 250 m spatial resolution MODIS annual land cover time series (2000–2011) for the forest region of Canada derived from change-based updating / D. Pouliot, R. Latifovic, N. Zabcic, L. Guindon, I. Oltho // Remote Sensing of Environment. – 2014. – № 140. – P. 731-743.
41.Running, S.W. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production / S.W. Running, R.R. Nemani, F.A. Heinsch et al. // Bioscience. – 2004. –Vol. 54. – P. 547-560.
42.Roy, D.P. The collection 5 MODIS burned area product - global evaluation by comparison with the MODIS active fire product / D.P .Roy, L. Boschetti, C.O. Justice, J. Ju // Remote Sensing of Environment. – 2008. –Vol. 112. – P. 3690–3707.
43.Spruce, J.P. Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by gypsy moth outbreaks / J.P. Spruce, S. Sader, R. E. Ryan et al // Remote Sensing of Environment. – 2011. – № 115. – P. 427–437.
44.Sulla-Menashe, D. Detecting forest disturbance in the Pacific Northwest from MODIS time series using temporal segmentation / D. Sulla-Menashe, R.E. Kennedy, Z. Yang et al. // Remote Sensing of Environment. – 2014. – № 151. – P. 114–123.
45.Tottrup, C. Mapping fractional forest cover across the highlands of mainland Southeast Asia using MODIS data and regression tree modelling / C.Tottrup, M. S. Rasmussen, L. Eklundh and P. Jönsson // International Journal of Remote Sensing. – 2007. – № 28(1). – P. 23-46.
46.Turner, D.P. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes / D.P. Turner, W.D. Ritts, W.B. Cohen et al. // Remote Sensing of Environment. – 2006. – № 102. – P. 282-292.
47.Wu, C. Modeling growing season phenology in North American forests using seasonal mean vegetation indices from MODIS / Wu, C., G. Alemu, C.M. Gough, J.M. Chen, S. Xu // Remote Sensing of Environment. – 2014. – Vol. 147. – P. 79-88.

УДК: 630.56

ВЛИЯНИЕ ВОДОУДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ

Н.Н. Бессчетнова, В.П. Бессчетнов
Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия

В статье исследуется неоднородность в составе плюсовых деревьев сосны обыкновенной по оценкам их физиологического статуса, определяющего биологическую продуктивность насаждений. Установлена наследственная обусловленность различий по способности удерживать влагу в хвое. Величина периода критической водопотери и сопутствующих показателей находится под контролем генотипа на 36,78-63,75%. Отмечено влияние экологических условий на проявление общей фенотипической дисперсии.

***Ключевые слова**: сосна обыкновенная, водоудерживающая способность, биологическая продуктивность лесных экосистем.*

THE EFFECT OF WATER-HOLDING CAPACITY AS A FACTOR OF STABILITY INCREASING AND BIOLOGICAL PRODUCTIVITY OF PINE FORESTS

N.N. Besschetnova, V.P. Besschetnov
Nizhny Novgorod state agricultural Academy

This article examines the heterogeneity in the composition of plus trees of Scots pine according to estimates of their physiological status, determining biological productivity of plantations. Installed the hereditary conditionality of differences in ability to retain moisture in the pine needles. The magnitude of the critical water losses period and related indicators is under the control of genotype on 36,78 – to 63.75 percent. The influence of environmental conditions on the expression of total phenotypic variance is noted in the article.

***Keywords**: Scots pine, water-holding capacity, biological productivity of forest ecosystems.*

Введение. Имеющиеся прогнозы изменений климатических параметров, вызванных глобальным потеплением, содержат сценарии, предполагающие уменьшение количества осадков, прежде всего в летний период, и, как следствие, снижение относительной влажности воздуха и почв, нарастание частоты возникновения засух. Это неизбежно повлечет за собой усиление процессов остепнения территорий, которые в высокой степени вероятны в Среднем Поволжье (Груза, 2011; Semenov, 2010). В условиях глобальных изменений климата важную роль в сохранении устойчивых насаждений играют локальные адаптации древесных растений составляющих леса. В соответствии с этим в число важнейших характеристик растений, вовлекаемых в процессы лесовосстановления, вводятся оценки их физиологического статуса, определяющие потенциал устойчивости к факторам среды. Это в конечном итоге формирует возможности сохранения биоразнообразия лесов и поддержания высокого уровня продуктивности насаждений в условиях глобальных изменений климата (Курбанов 2007; Курбанов, Воробьев, 2014). К таким характеристикам вполне обоснованно относят засухоустойчивость, оцениваемую, в частности, по водоудерживающей способности листового аппарата, которая служит убедительной оценкой локальной адаптированности древесных растений к важнейшим климатическим параметрам в контексте их глобальных изменений, выступает эффективным инструментом в оценке биологического состояния древесных растений.

Особое значение указанная проблема приобретает в отношении основных лесообразующих пород, в число которых входит сосна обыкновенная (*Pinus silvestris* L.). Занимая обширные площади в Среднем Поволжье, она является одной из наиболее значимых в хозяйственном плане древесных пород в Российской федерации (Алехин, 1935; Аверкиев, 1954; Полуяхтов, 1974; Куприянов, 1995; Курбанов, 2002; Бессчетнов, 2005). Её использование многопрофильно по целевому назначению и возможно с реализацией интенсивных форм ведения хозяйства. Важным аспектом такого режима эксплуатации сосновых насаждений выступает широкое применение средств селекционного улучшения лесов (Бесчетнова, 2011а; 2014; 2015; 2016). Повышение их биологической продуктивности возможно путем введения в состав на этапе искусственного лесовосстановления потомств, полученных из улучшенных семян. Важность и своевременность указанные аспекты приобретают в связи с расширением работ по лесовосстановлению и лесоразведению, которые в контексте задач, определенных Государственной программой Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства на 2013 - 2020 годы» (2013), ориентированы на преимущественное использование улучшенных семян в производстве используемого при этом посадочного материала. Основным источником таких семян выступают лесосеменные плантации, создаваемые из плюсовых деревьев.

Цель исследования – дать сравнительную оценку засухоустойчивости плюсовых деревьев сосны обыкновенной по водоудерживающей способности хвои.

Объектом исследования явились плюсовые деревья сосны обыкновенной, отобранные в естественных насаждениях Нижегородской области, зарезервированные в архивах клонов № 1, № 4, № 12 и используемые в ассортименте лесосеменных плантаций: ЛСП № 1, ЛСП № 2, ЛСП № 24 государственного бюджетного учреждения Нижегородской области «Семеновский спецсемлесхоз» (ГБУ НО «Семеновский спецсемлесхоз») и его регионального филиала на территории Сокольского районного лесничества. Плюсовые деревья на этих объектах представлены следующим количественным составом: архив клонов № 1 – 23; архив клонов № 4 – 30; ЛСП № 2 – 19; ЛСП № 24 – 36; ЛСП №1 – 16.

Методика. Исследования проведены полевым стационарным и лабораторными методами с привлечением общепризнанных методических схем организации работ и постро-

ния выборок (Никитин, 1978; Доспехов, 1985; Гатаулин, 1992). В пределах каждого из участков (архивы клонов и ЛСП) обеспечивалась элиминация дифференцирующего влияния факторов среды. Для реализации данного условия методикой предусмотрено сравнительное изучение биологических образцов: побегов, хвои, одновременно заготовленных с рамет разных плюсовых деревьев, размещенных в условиях выровненного экофона, что удается достичь в пределах одной лесосеменной плантации или одного архива клонов, при одинаковом режиме их выращивания, и одинаковых схемах размещения, созданных в один срок, однотипным посадочным материалом (двухлетние привитые саженцы). В ассортименте лесосеменных плантаций вегетативного происхождения и архивов клонов каждое плюсовое дерево (ортет) представлено некоторым количеством своих вегетативных потомков (рамет). Количество ортетов и рамет определено проектом создания конкретного объекта ПЛСБ и ЕГСК, зафиксировано в его паспорте и других документах, регламентирующих порядок их создания.

Выявляли различия между клонами по способности противостоять иссушению по их реакции на свободное высушивание хвои. Вариантами опыта служили плюсовые деревья, представленные 6-14 раметами. С учетного растения (раметы) срезалось 3-8 побегов. Первичной единицей выборки служила навеска из 20 пар нормально развитых пучков хвои. Их помещали в маркированные по побегу пластиковые емкости по 0,21 л. Заготовленные в полевых условиях побеги доставлялись в аналитическую лабораторию в увлажненном состоянии и кратковременно хранились при низкой положительной температуре. Учитывали действующие методические разработки (Цельникер, 1955; Котов, 1981; 1987; 1995; Третьяков, 1990) и результаты собственных исследований (Бессчетнова, 2007; 2011б, в, г; 2012; 2014).

Перед высушиванием для достижения состояния полного насыщения водой, непосредственно перед взвешиванием, пучки намачивались в течение 1-го часа в пластиковых стаканчиках. После извлечения из воды каждая навеска отряхивалась, укладывалась на фильтровальную бумагу, с нее удалялись капли воды. Хвоя, достигшая максимального насыщения водой, взвешивалась на трехразрядных электронных лабораторных весах Acculab VIC-300d3 с точностью до 0,001 г., укладывалась в отдельный пластиковый стаканчик. Периодичность учета – 24 часа, продолжительность опыта – до 120 часов. Для большинства образцов этот период оказался достаточным для перехода показателя водопотери через критический рубеж – 50 %. Высушивание проводилось в одинаковых емкостях при температуре 20-23^{o}C, стабильной влажности и освещенности помещения, затем навеска упаковывалась в бумажный пакет для воздушной сушки в течение 8 месяцев. Воздушно сухая хвоя взвешивалась и высушивалась в сушильном шкафу до абсолютно сухого состояния при температуре 105^{o}C в течение 8 часов. В дисперсионных комплексах сопоставляли клоны только одного архива клонов или одной ЛСП.

Оценивали период потери 50 % содержащейся в хвое воды, что соответствует критическому уровню физиологического состояния растений. Основной причиной дифференциации растений по этому показателю является неодинаковое соотношение в их тканях связанной воды. Использовали алгоритм пропорционального вычисления значений времени до наступления критического состояния обезвоживания – 50% (Котов, 1981; 1987; 1995). Согласно ему фиксировали потерю влаги в процентах за 24 часа. Нами предложено определение периода потери половины содержащейся в хвое воды посредством решения уравнений регрессии, описывающих кривые изменения содержания воды, выраженного в процентах от общей массы содержащейся воды, в течение периода наблюдения через каждые 24 часа. Возможно применение различных видов функций: $y = ax + b$; $y = ax^2+bx + c$; $y = a\mathrm{Ln}(x) + b$ и др. При этом уравнение линейной зависимости дает вполне адекватную характеристику динамики водопотери, о чем свидетельствуют высокие значения показателя достоверности аппроксимации (в подавляющем большинстве случаев R^2 = 0,980 и выше). В этом отношении она близка по

надежности к полиному второго порядка. Такая процедура выполнялась для каждой навески и усредненных значений каждого учетного растения. Организация опыта позволила применить для анализа его результатов как однофакторный, так и двухфакторный иерархический дисперсионный анализ (Плохинский, 1961; Снедекор, 1961; Лакин, 1980).

Результаты. Обнаружена дифференциация плюсовых деревьев сосны обыкновенной, сосредоточенных в архивах клонов и на лесосеменных плантациях, по способности удерживать влагу в хвое, во многом определяющей потенциал их биологической продуктивности. На лесосеменной плантации № 1 Сокольского филиала ГБУ НО «Семеновский спецсемлесхоз» определение способности тканей хвои плюсовых деревьев поглощать и терять воду, оцениваемой периодом потери критической массы (50 %) влаги и сопутствующими показателями, дало следующие результаты (рис. 1).

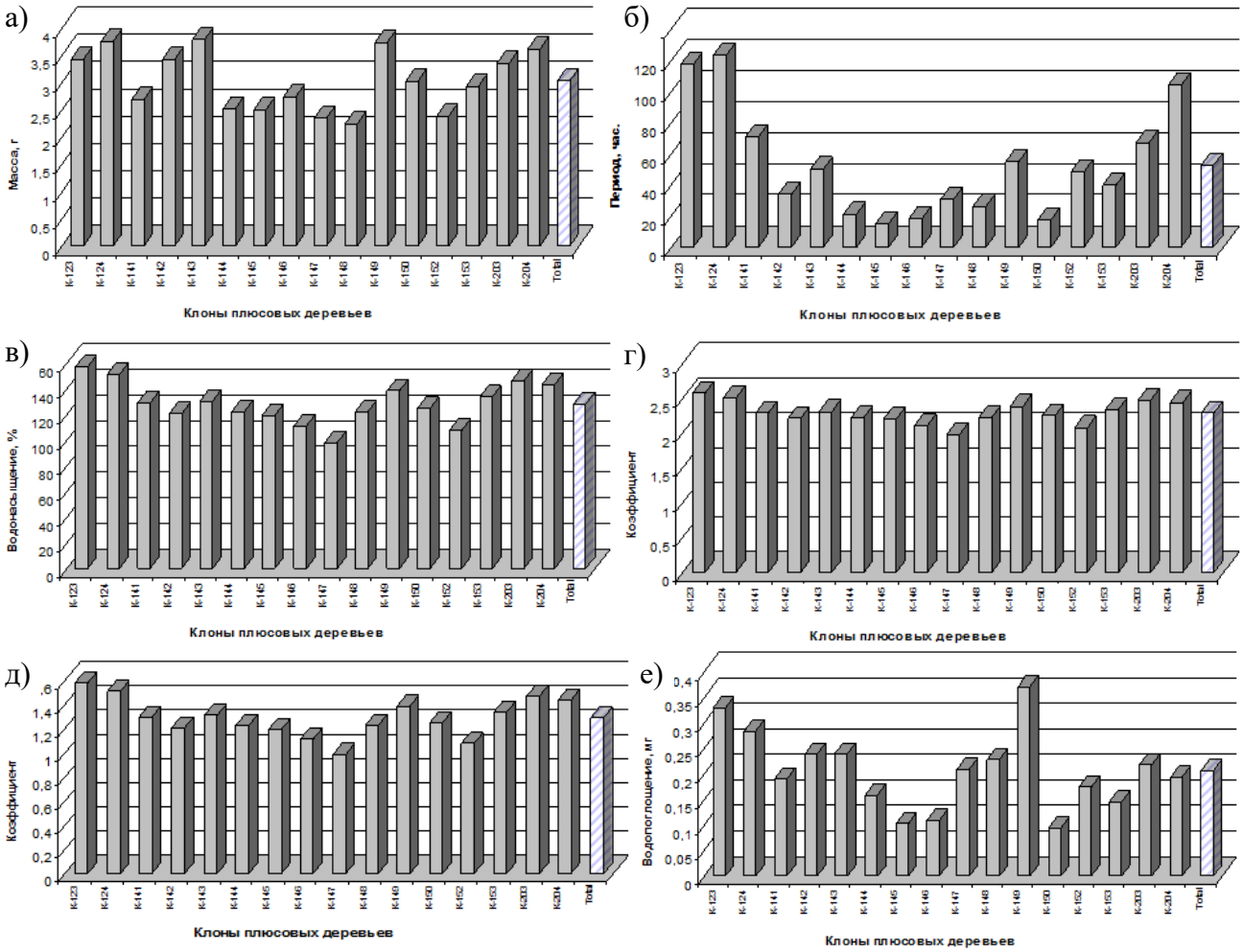


Рис. 1. Показатели водного баланса хвои плюсовых деревьев на ЛСП № 1 Сокольского филиала ГБУ НО «Семеновский спецсемлесхоз»: а) масса водонасыщенной хвои; б) период критической потери воды; в) процент абсолютного насыщения водой; г) коэффициент абсолютного насыщения водой; д) коэффициент разности абсолютного насыщения водой; е) показатель первичного поглощения воды

Отчетливо наблюдаются значительные различия плюсовых деревьев по показателям массы водонасыщенной хвои (см. рис. 1 а). Графический материал указывает на неодинаковую способность хвои разных плюсовых деревьев поглощать и удерживать воду в соответствии с оценками продолжительности периода критической (50 %) потери воды (см. рис. 1 б). Свою специфику в соотношении значений плюсовых деревьев имели оценки степени насыщения водой хвои, вычисленные относительно её массы в абсолютно сухом состоянии (см. рис. 1 в – 1 д). Здесь отчетливо наблюдается весьма сходный характер графического отображения соотношений между анализируемыми объектами по этим признакам. Плюсовые деревья

К-123, К-124 (в крайней левой зоне гистограмм) устойчиво занимают лидирующие позиции, в то время как К-147 (центральная часть гистограмм) всегда демонстрирует наименьшие величины. Группа, представленная образцами К-147, К-148, К-149, К-150, К-152, визуально легко обнаруживается на каждом из рассматриваемых рисунков (см. рис. 1 в – 1 д), так же как и группа, состоящая из объектов К-152, К-153, К-203, К-204 и образца «Total», соответствующего значению обобщенного среднего для всего анализируемого комплекса. Следует обратить внимание на то, что и в этом случае полного совпадения соотношений не зафиксировано, и каждый из рисунков (см. рис. 1 в – 1 д) сохраняет свою графическую индивидуальность в той или иной степени. Свою особенность, отраженную на диаграмме, имело соотношение между плюсовыми деревьями в соответствии со средними значениями их признака: «первичное поглощение воды хвоей при её намачивании относительно исходной (сухой) массы» (см. рис.1 е).

Поскольку перечисленные выше различия проявились у клонов в условиях выровненного экофона, то их наличие можно объяснить наследственными причинами. Дисперсионный анализ, проведенный по однофакторной схеме (табл. 1), позволил установить, что различия между клонами по всем объектам исследования и срокам учета являются существенными, о чем свидетельствуют рассчитанные величины критерия Фишера как на 5 %, так и 1 % уровне значимости, во много раз превышающие табличные значения.

Установленное влияние организованных факторов на выявленные различия, вычисленные по алгоритмам Плохинского и Снедекора, оказалось высоким и вполне сопоставимым по всем обследованным объектам. На ЛСП № 1 (см. табл. 1) большие величины отмечены по продолжительности периода достижения состояния критического обезвоживания тканей хвои при её свободном высушивании (63,75±1,06 % - признак 5) и проценту полного водонасыщения хвои от её абсолютно сухого состояния (60,06±1,17 % - признак 8). Заметно меньше значения по отношению массы первично поглощенной воды при намачивании хвои к её абсолютно сухой массе (36,78±1,85 % - признак 12) и количеству первично поглощенной воды как разнице между массой хвои в состоянии водонасыщения и свежесобранном состоянии (39,40±1,78 % - признак 11). Оценки наименьшей существенной разности ($НСР_{05}$) и критерия Тьюки (D_{05}) позволили установить, между какими именно плюсовыми деревьями различия относятся к категории существенных. Их оказалось большинство.

Таблица 1

Оценки существенности различий между плюсовыми деревьями по показателям водного баланса 1-летней хвои на ЛСП № 1

Показатели	Критерий Фишера		Доля влияния фактора ($h^2 \pm s_{h2}$)				Критерии различий	
			по Плохинскому		по Снедекору			
	$F_{оп}$	F_{05} / F_{01}	h^2	$\pm s_{h2}$	h^2	$\pm s_{h2}$	$НСР_{05}$	D_{05}
Признак 1	39,41	1,67/2,04	0,5359	0,0136	0,5379	0,0135	0,23	0,41
Признак 2	40,94	1,67/2,04	0,5454	0,0133	0,5476	0,0133	0,24	0,43
Признак 3	30,59	1,67/2,04	0,4726	0,0155	0,4728	0,0154	0,10	0,18
Признак 4	30,26	1,67/2,04	0,4699	0,0155	0,4700	0,0155	0,09	0,17
Признак 5	60,02	1,67/2,04	0,6375	0,0106	0,6414	0,0105	12,67	22,86
Признак 6	44,97	1,67/2,04	0,5685	0,0126	0,5713	0,0126	0,14	0,26
Признак 7	47,11	1,67/2,04	0,5799	0,0123	0,5829	0,0122	0,16	0,28
Признак 8	51,33	1,67/2,04	0,6006	0,0117	0,6040	0,0116	6,25	11,28
Признак 9	51,33	1,67/2,04	0,6006	0,0117	0,6040	0,0116	0,06	0,11
Признак 10	51,33	1,67/2,04	0,6006	0,0117	0,6040	0,0116	0,06	0,11
Признак 11	22,19	1,67/2,04	0,3940	0,0178	0,3910	0,0178	0,05	0,08
Признак 12	19,86	1,67/2,04	0,3678	0,0185	0,3636	0,0186	0,03	0,06

Примечание: В таблице 1 приняты следующие сокращения и обозначения:

1. Обозначения показателей: $F_{оп}$ – опытный критерий Фишера; F_{05} / F_{01} – табличные значения критерия Фишера соответственно на 5-процентном и 1-процентном уровнях значимости; h^2–показатель силы влияния фактора; ± sh^2 – ошибка показателя силы влияния фактора; $НСР_{05}$ – наименьшая существенная разность на

5-процентном уровне значимости; D_{05} – критерий Тьюки на 5-процентном уровне значимости.

2. Обозначения признаков:

- признак 1 – масса хвои в свежесобранном состоянии (сырая масса);
- признак 2 – масса хвои в насыщенном водой состоянии;
- признак 3 – масса хвои в воздушно-сухом состоянии (сухая масса);
- признак 4 – масса хвои в абсолютно сухом состоянии (абсолютно сухая масса);
- признак 5 – продолжительность периода критического (50 %) обезвоживания;
- признак 6 – разность между массой хвои в свежесобранном и абсолютно сухом состояниях;
- признак 7 – разность между массой хвои в водонасыщенном и абсолютно сухом состояниях;
- признак 8 – процент полного водонасыщения хвои от её абсолютно сухого состояния;
- признак 9 – коэффициент полного водонасыщения как отношение массы хвои в водонасыщенном состоянии к массе хвои в абсолютно сухом состоянии;
- признак 10 – коэффициент разности масс при полном водонасыщении как отношение разности массы хвои в водонасыщенном и абсолютно сухом состояниях к массе хвои в абсолютно сухом состоянии;
- признак 11 – первичное поглощение воды хвоей как разница между массой в свежесобранном и водонасыщенном состоянии;
- признак 12 – отношение массы первично поглощенной воды к абсолютно сухой массе.

Необходимо отметить, что на указанной ЛСП побеги для эксперимента были заготовлены при декапитации кроны. Это были самые развитые вегетативные побеги, а однотипность хвои была максимальной. Значительная доля влияния неорганизованных факторов по ряду признаков свидетельствует о большой зависимости водоудерживающей способности хвои плюсовых деревьев сосны обыкновенной от факторов среды, что может нивелировать различия, обусловленные генотипически.

Двухфакторный дисперсионный анализ, выполненный по иерархической схеме, предоставил возможность отдельно оценить действие каждого из организованных факторов данного опыта: различия между ортетами (собственно плюсовыми деревьями) и различия между рametами (прививками, выступавшими учетными растениями) по всем анализируемым признакам (табл. 2).

Таблица 2

Результаты двухфакторного иерархического дисперсионного анализа показателей водного баланса однолетней хвои сосны обыкновенной ЛСП № 1 (Сокольский филиал ГБУ НО «Семеновский спецсемлесхоз»)

Индекс признака	Источник дисперсии, фактор	Критерий Фишера (F)		Доля влияния фактора ($h^2 \pm s_{h2}$)			
				по Плохинскому		по Снедекору	
		$F_{оп}$	$F_{05/01}$	h^2	$\pm s_{h2}$	h^2	$\pm s_{h2}$
	ортеты (A)	5,780	1,99/ 2,66	0,5359	0,0145	0,4999	0,0156
Признак 1	раметы (B)	11,140	1,49/ 1,74	0,1978	0,0535	0,2399	0,0507
	остаток (Z)	-	-	0,2663	0,7337	0,2602	0,7398
	ортеты (A)	6,226	1,99/ 2,66	0,5454	0,0142	0,5110	0,0153
Признак 2	раметы (B)	10,469	1,49/ 1,74	0,1869	0,0542	0,2262	0,0516
	остаток (Z)	-	-	0,2678	0,7322	0,2628	0,7372
	ортеты (A)	5,160	1,99/ 2,66	0,4726	0,0165	0,4410	0,0175
Признак 3	раметы (B)	8,828	1,49/ 1,74	0,1954	0,0536	0,2324	0,0512
	остаток (Z)	-	-	0,3320	0,6680	0,3266	0,6734
	ортеты (A)	5,174	1,99/ 2,66	0,4699	0,0166	0,4387	0,0175
Признак 4	раметы (B)	8,644	1,49/ 1,74	0,1938	0,0537	0,2301	0,0513
	остаток (Z)	-	-	0,3363	0,6637	0,3312	0,6688
	ортеты (A)	11,413	1,99/ 2,66	0,6375	0,0113	0,6142	0,0121
Признак 5	раметы (B)	7,344	1,49/ 1,74	0,1192	0,0587	0,1411	0,0573
	остаток (Z)	-	-	0,2434	0,7566	0,2447	0,7553
	ортеты (A)	5,891	1,99/ 2,66	0,5685	0,0135	0,5284	0,0147

Окончание таблицы 2

Признак 6	раметы (B)	13,686	1,49/ 1,74	0,2059	0,0529	0,2526	0,0498
	остаток (Z)	-	-	0,2256	0,7744	0,2190	0,7810
	ортеты (A)	6,622	1,99/ 2,66	0,5799	0,0131	0,5432	0,0143
Признак 7	раметы (B)	12,010	1,49/ 1,74	0,1868	0,0542	0,2285	0,0514
	остаток (Z)	-	-	0,2333	0,7667	0,2283	0,7717
	ортеты (A)	5,834	1,99/ 2,66	0,6006	0,0125	0,5548	0,0139
Признак 8	раметы (B)	18,324	1,49/ 1,74	0,2196	0,0520	0,2723	0,0485
	остаток (Z)	-	-	0,1798	0,8202	0,1729	0,8271
	ортеты (A)	5,834	1,99/ 2,66	0,6006	0,0125	0,5548	0,0139
Признак 9	раметы (B)	18,324	1,49/ 1,74	0,2196	0,0520	0,2723	0,0485
	остаток (Z)	-	-	0,1798	0,8202	0,1729	0,8271
	ортеты (A)	5,834	1,99/ 2,66	0,6006	0,0125	0,5548	0,0139
Признак 10	раметы (B)	18,324	1,49/ 1,74	0,2196	0,0520	0,2723	0,0485
	остаток (Z)	-	-	0,1798	0,8202	0,1729	0,8271
	ортеты (A)	3,973	1,99/ 2,66	0,3940	0,0189	0,3638	0,0199
Признак 11	раметы (B)	8,043	1,49/ 1,74	0,2115	0,0526	0,2483	0,0501
	остаток (Z)	-	-	0,3945	0,6055	0,3879	0,6121
	ортеты (A)	3,554	1,99/ 2,66	0,3678	0,0198	0,3377	0,0207
Признак 12	раметы (B)	8,047	1,49/ 1,74	0,2207	0,0520	0,2586	0,0494
	остаток (Z)	-	-	0,4115	0,5885	0,4037	0,5963

Примечание: 1. Обозначения факторов влияния: A – организованный фактор высшей иерархии – различия между плюсовыми деревьям, представленными клоновыми репродукциями; B – организованный фактор низшей иерархии – различия между учетными деревьями одного плюсового дерева; Z – остаточная дисперсия, соответствующая внутригрупповой (случайной) изменчивости. 2. Обозначения показателей и признаков соответствуют порядку, принятому для таблицы 1.

Представленный в таблице 2 материал подтвердил существенность различий между плюсовыми деревьями, установленную в ходе проведения однофакторного дисперсионного анализа. Опытные критерии Фишера, как это заметно в табличных данных, превышают минимально допустимый порог во всех случаях анализа. Для подавляющего большинства признаков доля влияния различий между ортетами преобладает над всеми остальными и соответствует результатам однофакторного анализа. В частности, по продолжительности периода критического обезвоживания она составила 63,75±1,13 %. Наименьшая из зафиксированных величин составила 36,78±1,98 % (отношение массы первично поглощенной воды к абсолютно сухой массе). Исключение в отмеченной общей тенденции составляли признаки «масса первично поглощенной воды при намачивании хвои» и «отношение массы первично поглощенной воды при намачивании хвои к её абсолютно сухой массе»: здесь доминирует влияние факторов среды или остаточная дисперсия. Существенными можно признать и различия между учетными деревьями (раметами), что также подтверждено достаточными расчетными значениями критериев Фишера. Доля их влияния составляет от 11,92±5,87 % (признак 5) до 22,07±5,20 % (признак 12). Высокие оценки степени наследственной обусловленности различий между плюсовыми деревьями, полученные в ходе проведения дисперсионного анализа (по однофакторной и двухфакторной схемам), позволяют рекомендовать признаки, по которым они наблюдались, для включения в проведение многомерного анализа и для вычисления значений индекса неидентичности объектов.

Обсуждение. Плюсовые деревья сосны обыкновенной при сравнительной оценке их вегетативных потомств в архивах клонов и на лесосеменных плантациях демонстрируют вы-

раженную дифференциацию в показателях баланса содержания воды в хвое. Они различались средними величинами массы хвои в момент её заготовки, после увлажнения до стабильного водонасыщения и высушивания до воздушно-сухого и абсолютно сухого состояния, а также продолжительностью периода достижения состояния критического обезвоживания при свободном высушивании.

При этом изменчивость анализируемых характеристик неодинакова и в ряде случаев достигала очень высокого уровня по шкале Мамаева. Данное заключение справедливо и для остальных признаков. Оно не теряет своей значимости для длительного периода наблюдений на всех опытных участках, то есть мы имеем дело с устойчиво сохраняющейся тенденцией или закономерностью. В конечном итоге такие оценки формируют представления о различиях в их биологической продуктивности, а полученные данные указывают на неоднородность насаждений сосны обыкновенной в указанном аспекте.

Картина соотносительных различий между плюсовыми деревьями на каждом из опытных участков весьма стабильна и как тенденция в основных чертах сохраняется в соответствующих архивах их клонов и на лесосеменных плантациях. Тенденция обнаруживает и временную (в течение ряда лет периода наблюдений) устойчивость. Это позволяет рассматривать её как принципиальное подтверждение фенотипической неоднородности сформированных составов плюсовых деревьев в исследованных объектах ПЛСБ и ЕГСК по анализируемым характеристикам водного баланса хвои.

Показатели водообеспеченности хвои плюсовых деревьев находятся под выраженным контролем со стороны их генотипа. Об этом свидетельствуют многочисленные результаты дисперсионного анализа, проводимого в течение ряда лет по однофакторной и двухфакторной схеме, на опытных участках, представленных лесосеменными плантациями и архивами клонов. При этом коэффициенты наследуемости тестируемых признаков достаточно велики и статистически достоверны. Чаще доля влияния различий между ортетами на формирование общей фиксируемой в опыте фенотипической изменчивости преобладает или составляет значительную часть.

Это обстоятельство позволяет рекомендовать использованные в данной части работы признаки для надежной идентификации плюсовых деревьев, осуществляемой в ходе ревизии их ассортимента при селекционной инвентаризации объектов ПЛСБ и ЕГС. На том же основании указанные признаки могут быть задействованы в многомерном анализе, что позволит осуществить идентификацию с большей надежностью. Эффективность мероприятий, направленных на обеспечение чистоты ассортимента лесосеменных плантаций и архивов клонов, во многом определяется надежностью методов решения классификационных и идентификационных задач, неизбежно возникающих в этой связи. Точность получаемых при этом оценок отдаленности-близости плюсовых деревьев в значительной мере определяется комплексностью построения опытных схем и привлечением для их реализации многомерных методов. Это вытекает из представлений о плюсовых деревьях (о деревьях вообще) как о многопараметрических объектах. В таких обстоятельствах важно обозначить наиболее информативные признаки, способные обеспечить контрастность определения различий между сравниваемыми образцами. Признаки водного баланса в хвое плюсовых деревьев сосны обыкновенной, являясь надежными показателями биологической продуктивности, с полным основанием могут быть отнесены к их числу.

Работа выполнена по проекту № 2394 «Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем» в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации 2014-2016 гг.

Библиографический список

1. Аверкиев, Д.С. История развития растительного покрова Горьковской области и ее ботанико-географическое деление / Д.С. Аверкиев // Ученые записки Горьковского государственного университета. – Горький: ГГУ, 1954. – Вып. XXV. – С. 119-136.
2. Алехин, В.В. Объяснительная записка к геоботаническим картам (современной и восстановленной) бывшей Нижегородской губернии (в масштабе 1:500.000) / В.В. Алехин. – Ленинград - Горький: Горьковский государственный университет - 1 картографическая фабрика ВКТ (тип. 1 картогр. фабрики ВКТ). – 1935. – 67 с.
3. Бессчетнов, В.П. Лесные ресурсы Нижегородской области и оптимизация их использования / В.П. Бессчетнов, А.И. Старцев, В.К. Хлюстов, Н.В. Петухов // Комплексное развитие сельского и лесного хозяйства. – Нижний Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии государственной службы, 2005. – С. 111-137.
4. Бессчетнова, Н.Н. Водоудерживающая способность хвои плюсовых деревьев сосны обыкновенной / Н.Н. Бессчетнова // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-тех. конф. Вып. 17. – Брянск: БГИТА, 2007б. – С. 13-16.
5. Бессчетнова, Н.Н. Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris L.). Селекционный потенциал плюсовых деревьев / Н.Н. Бессчетнова. – Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic PublishingGmbH&co. KG. (ISBN 978-3-8443-5608 -3), 2011а. – 402 с.
6. Бессчетнова, Н.Н. К методике определения периода критического обезвоживания хвои плюсовых деревьев сосны обыкновенной (Pinus sylvestris l.) / Н.Н. Бессчетнова // Вестник Марийского государственного технического университета . Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2011б. – № 2 (12). – С. 3-12.
7. Бессчетнова, Н.Н. Сравнительная оценка клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной по темпам водопотери хвои / Н.Н. Бессчетнова // Вестник московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2011в. – № 3(79). – С. 36-41
8. Бессчетнова, Н.Н. Содержание сухого вещества в хвое клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной / Н.Н. Бессчетнова // Вестник московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2011. – № 5 (81). – С. 15-19.
9. Бессчетнова, Н.Н. Корреляция показателей баланса воды и содержания сухого вещества в хвое плюсовых деревьев сосны обыкновенной / Н.Н. Бессчетнова // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2012. – № 1 (15). – С. 28-36.
10. Бессчетнова, Н.Н. Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris L.). Морфометрия и физиология хвои плюсовых деревьев / Н.Н. Бессчетнова, В.П. Бессчетнов: монография. – Нижний Новгород: Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, 2014. – 368 с.
11. Бессчетнова, Н.Н. Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris L.). Репродуктивный потенциал плюсовых деревьев / Н.Н. Бессчетнова. – Нижний Новгород: Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, 2015. – 586 с.
12. Бессчетнова, Н.Н. Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris L.). Эффективность отбора плюсовых деревьев / Н.Н. Бессчетнова: монография. – Нижний Новгород: Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, 2016. – 464 с.
13. Гатаулин, А.М. Система прикладных статистико-математических методов обработки экспериментальных данных в сельском хозяйстве / А.М. Гатаулин. – В 2-х частях. Ч. 2. – М.: Изд-во МСХА, 1992. – 192 с.
14. Государственная программа Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства» на 2013-2020 годы: Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 дек. 2012 г. № 2593 - р: Председатель Правительства Российской Федерации Д. Медведев [Доступ – 17.09.2013: http://www.nbchr.ru/PDF/042_oos.pdf] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2013. – No 2. – 230 с.
15. Груза, Г.В. Оценка возможного вклада глобального потепления в генезис экстремально жарких летних сезонов на европейской территории РФ / Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 47. – № 6. – С. 1-4.
16. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта (С основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов. – Изд. пятое, доп. и перераб. – М.: Колос, 1985. – 416 с.
17. Котов, М.М. Метод селекционной оценки сосны на ПЛСУ / М.М. Котов // Экспресс-информация «Лесоразведение и лесомелиорация». – М.: ЦБНТИлесхоз, 1981. – Вып. 10. – 20 с.
18. Котов, М.М. Рекомендации по отбору сеянцев сосны для посадки на лесосеменные плантации / М.М. Котов. – Йошкар-Ола: НТО леспрома и лесн. хоз-ва, 1987. – 13 с.
19. Котов, М.М. Отбор сеянцев сосны для лесосеменных плантаций / М.М. Котов. // Лесное хозяйство. – 1995. –№ 1. – С. 44-46.
20. Курбанов, Э.А. Лесоводство. Международное лесное хозяйство: учебное пособие / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. – 254 с.
21. Курбанов, Э.А. Углерододепонирующие насаждения Киотского протокола / Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. – 184 с.
22. Курбанов Э.А. Бюджет углерода сосновых экосистем Волго-Вятского района / Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. – 300 с.
23. Куприянов, Н.В. Леса и лесное хозяйство Нижегородской области / Н.В. Куприянов, С.С. Веретенников, В.В. Шишов. – Нижний Новгород: Волго-Вятское книжное издательство, 1995. – 349 с.
24. Лакин, Г.Ф. Биометрия / Г.Ф. Лакин: учебное пособие для биологических специальностей вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1980. – 293 с.
25. Никитин, К.Е. Методы и техника обработки лесоводственной информации / К.Е. Никитин, А.З. Швиденко. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 272 с.

26. Плохинский, Н.А. Биометрия / Н.А. Плохинский. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1961. – 364с.
27. Полуяхтов, К.К. Лесорастительное районирование Горьковской области / К.К. Полуяхтов // Биологические основы повышения продуктивности и охраны лесных, луговых и водных фитоценозов Горьковского Поволжья. – Горький: ГГУ, 1974. – С.4-20.
28. Снедекор, Дж. У. Статистические методы в применении к исследованиям в сельском хозяйстве и биологии / Дж. У. Снедекор, пер. с англ. – М.: Изд-во с-х. лит., журн. и плакатов, 1961. – 503 с.
29. Третьяков, Н.Н. Практикум по физиологии растений / Н.Н. Третьяков, Т.В. Карнаухова, Л.А. Паничкин; под общ. ред. Н.Н. Третьякова – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1990. – 271 с.
30. Цельникер, Ю.Н. Скорость потери воды изолированными листьями древесных пород и устойчивость их к обезвоживанию / Ю.Л. Цельникер // Труды института леса АН СССР. – М., 1955. – Т. 27. – С. 6-28.
31. Semenov, V.A. The impact of North Atlantic Arctic multidecadal variability on Northern hemisphere surface air temperature [Free access – 17.10.2016: http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2010JCLI3347.1] / V.A. Semenov, M. Latif, D. Dommenget, N.S. Keenlyside, A. Strehz, T. Martin, W. Park // Journal of Climate. – 2010. – Vol. 23. – No. 21. – P. 5668-5677.

УДК 33.338.2

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Н.А. Хуторова
Российская Академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Представлены основные направления экологизации экономической политики государства, обоснована возможность получения экономической эффективности за счет использования инструментов экологизации экономической политики в условиях изменения климата. Рассчитаны показатели энергоемкости и углеродоемкости стран - основных эмитентов ПГ. Отмечена необходимость разработки политики экологизации российской экономики с учетом наработанной практики международных организаций и крупных ТНК. Показано, что улучшение экологических показателей повышает конкурентоспособность компании, способствует развитию новых направлений бизнеса и стимулирует развитие инновационных технологий. Отмечено, что экологизация экономической политики должна происходить на всех уровнях взаимодействия: государство, бизнес, общество. Ведущая роль в этом процессе должна принадлежать государству.

Ключевые слова: *экологизация, экономическая политика, изменение климата.*

ECONOMIC POLICY'S GREENING IN CONDITIONS OF CLIMATE CHANGE

N.A. Khutorova
The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration

The basic directions of national greening economic policy are provided in this article. It is proved that green instruments using could be profitable in current situation. Main indicators of energy intensity and carbon intensity are calculated in this article. It is necessary to greening Russian economic policy, taking into account the practice of international organizations and large multinational corporations. Improving the green indicators enhances is the way to increase competitive advantage of the company and to develop the new business and stimulate the development of innovative technologies. It is pointed out that the greening of economic policies should be created at all levels of interaction: the state, business and society. The leading role in this process must belong to the state.

Keywords: *greening, economic policy, climate change.*

Проблемы экологизации мировой экономики в условиях негативных изменений климата в последние годы приобретают все более важное значение. Разработкой и внедрением экологи-

ческой политики озадачены хозяйствующие субъекты всех секторов экономики во всех странах мира. Усилия компаний и корпораций, направленные на снижение негативного воздействия на окружающую среду при производстве товаров и услуг, становятся ключевым фактором успеха в сфере экологизации экономики.

Экологизация экономики – процесс развития социально-экологической ответственности государства, бизнеса и гражданина, включающий в себя комплекс юридических, экономических, управленческих и технологических решений, направленный на снижение негативного воздействия антропогенной нагрузки на экосистему (Хуторова, 2013).

Приоритет экологической составляющей отмечен в современных стратегиях развития любой большой компании, в первую очередь транснациональных корпораций и банков (ТНК) и ТНБ, а также все больше внимания экологизации своей политики развития уделяют предприятия малого и среднего бизнеса (МСБ). В ходе проведенных многочисленных исследований доказана четкая корреляция между экологизацией производства и инвестиционной привлекательностью компании. Улучшение экологических показателей повышает конкурентоспособность компании, способствует развитию новых направлений бизнеса в особенности для МСБ и стимулирует повышение уровня инновационности экономики в целом.

Основной целью данной работы стало обоснование возможности получения экономической эффективности за счет использования инструментов экологизации экономической политики в условиях изменения климата.

В 2015 г. международное сообщество сделало существенные шаги к созданию модели зеленой экономики, утвердив Повестку дня в области устойчивого развития до 2030 года[1] и подписав Парижское соглашение по вопросам изменения климата[2], это стало настоящим прорывом после нескольких лет бездействия.

Парижское соглашение по вопросам изменения климата определяет принципы экологической устойчивости и социальной справедливости, которые неразрывно связаны и объединены с экономическим прогрессом, и устанавливает конкретные обязательства стран по сокращению выбросов в период до 2030 года[3].

Парижское соглашение фокусирует внимание на трёх принципах:

• Согласованность и взаимодействие - усовершенствование путей достижения согласованности при принятии политических решений в рамках системы ООН и многосторонних природоохранных соглашений.

• Правовые и организационные меры – укрепление потенциала стран в принятии и обеспечении соблюдения правовых и институциональных рамок для решения наиболее важных экологических проблем.

• Интеграция вопросов охраны окружающей среды в планы развития – оказание содействия развивающимся странам в борьбе с изменениями климата и ликвидации бедности.

В целом для создания всеохватывающей модели зеленой экономики страны взяли обязательства ежегодно до 2030 года сокращать уровень выбросов в атмосферу до 12 гигатонн углекислого газа, что создает возможности для удержания роста температуры до 2 градусов (ЮНЕП 2015 год).

В таблице 1 представлены страны с наибольшим вкладом в эмиссию ПГ в 2015 году, суммарные выбросы ПГ которых составили 70,1% с учетом показателей энергоёмкости и углеродоемкости экономики.

[1]Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года от 25.09.2015. Документ содержит 17 целей в области устойчивого развития и 169 конкретных задач на ближайшие 15 лет http://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1_ru.pdf .

[2]Парижское соглашение было принято всеми 196 сторонами Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКООНИК) на 21-й Конференции сторон РКООНИК, подписано 12.12. 2015 года.

[3]Там же

Таблица 1

Показатели энергоемкости и углеродоемкости экономики отдельных стран в 2015 году (на основе данных: МЭА, 2016; Мировая энергетическая статистика, 2016; Climate Action Tracker, 2106))

	Страна	Доля выбросов ПГ	Энергоемкость (кг нефт.экв/ ВВП долл. США по ППС 2005)	Углеродоемкость (выбросы CO_2 кг/ ВВП долл. США по ППС 2010)	Цель в рамках Парижского соглашения к 2030 г.
1	Китай	24,5%	0,194	0,54	Сокращение углеродоемкости ВВП на 60-65% относительно уровня 2005 г.; расширение объема лесного фонда на 4,5 млрд куб. м относительно 2005 г.
2	США	13,9%	0,145	0,32	Сокращение объемов выбросов ПГ на 26-28% относительно уровня 2005 г. к 2025 году
3	Страны ЕС (28)	9,8%		0,21	Сокращение выбросов на 40% к 2030 г. относительно 1990 г.
4	Индия	6,7%	0,131	0,29	Сократить углеродоемкость ВВП на 33 -35% от уровня 2005 г.
5	**Россия**	**5,2%**	**0,337**	**0,46**	**Сокращение выбросов ПГ к 2030 г. на 25-30% от уровня 1990 г., при условии максимально возможного учета поглощающей способности лесов.**
6	Япония	3,0%	0,106	0,27	Сокращение выбросов ПГ к 2030 г. на 26% от уровня 2013 г.
7	Бразилия	2,3%	0,119	0,16	Сокращение выбросов ПГ на 66% к 2025 г. относительно показателей 2005 г. и на 75% к 2030 г.
8	Мексика	1,6%	0,112	0,22	Сокращение выбросов ПГ на 22% к 2030 г.
9	Канада	1,6%	0,29	0,37	Снижение выбросов ПГ на 30% относительно 2005 г.
10	Южная Корея	1,5%	0,169	0,33	Сокращение выбросов ПГ к 2030 г. на 37% по сравнению с инерционным сценарием
	Мир	**100%**	**0,149**	**0,32**	**Ежегодное сокращение выбросов ПГ до 12 гигатонн до 2030 г.**

Как показывает практика, в настоящее время именно показатели энергоемкости и углеродоемкости и особенно их динамика признаются важнейшими при характеристике уровня экологизации национальной экономики в целом.

К сожалению, экономика России в 2015 году с показателем 0,337 признана самой энергоемкой в мире, в то время как самые низкий уровень энергоемкости в 0,076 показала экономика Великобритании. Также по показателям углеродоемкости экономика России занимает второе место (0,46) в мире, уступая первенство Китаю (0,54). Оптимизм внушает динамика этих показателей за 2000-2015 гг.: так, энергоемкость и углеродоемкость экономики России снизились почти на 45% и 25% соответственно и имеет большой потенциал в использовании энергосберегающих и экологичных технологий в будущем (Climate Action Tracker, 2016).

В целом по миру в период 2000-2015 гг. энергоемкость снижалась на 1,5% в год. В 2015 году мировая экономика прирасла на 2,8%, потребление энергии выросло на 0,5%, но эмиссия ПГ впервые сократилась на 0,2%, в то время как в 2014 году рост мировой экономики на 3,7% сопровождался ростом эмиссии ПГ на 0,9% (Energy press release, 2016).

Для достижения заявленных целей каждая страна разрабатывает свою уникальную политику экологизации и модель построения зеленой экономики, определяет принципы экологи-

ческой устойчивости и социальной справедливости, которые неразрывно связаны и объединены с экономическим прогрессом (Курбанов, Воробьев, 2014).

Экологизация экономической политики должна происходить на всех уровнях взаимодействия: государство, бизнес, общество. В этой модели трудно переоценить роль каждого, также необходимо изучать и адаптировать наработанный опыт международных и иностранных компаний для нужд своей страны. Безусловно, зеленый вектор развития национальной экономики должен быть задан государством и проводиться в жизнь на уровне компаний и домашних хозяйств.

Важно четко расставить приоритеты, современная экологическая политика развитой страны должна быть направлена на создание новых механизмов хозяйствования с основным акцентом на низкие уровни углеродоемкости (Курбанов и др., 2008), малоотходность, т.е. на дружественные экосистеме, ресурсосберегающие технологии. К сожалению, стоит отметить, что зачастую экологическая политика направлена на компенсацию уже причинённого вреда, т.е. на ликвидацию негативных последствий.

В рамках данной работы основные направления экологизации экономической политики государства выделены в два блока: организационный и финансово-экономический.

Блок организационных направлений:

- увеличение доли возобновляемых источников энергии в энергобалансе страны;
- повышение энергоэффективности за счет новых экологичных технологий;
- сохранение и расширение лесного покрова и биоразнообразия;
- внедрение практики экологически ответственного производства и потребления на всех уровнях общества;
- совершенствование технологий по утилизации отходов производства и потребления;
- внедрение системы экологического менеджмента на предприятиях в соответствии со стандартом ISO 14001;
- внедрение зеленой сертификации;
- совершенствование института корпоративной социальной ответственности как для крупных компаний, так для предприятий малого и среднего бизнеса;
- формирование экологической культуры населения и компаний, повышение уровня образования в этой сфере;
- организация системы подготовки и переподготовки квалифицированных кадров в области экологической ответственности и экологического менеджмента;
- поддержка профессиональных сообществ в области популяризации экологической ответственности;
- создание информационного центра для «зеленого» бизнеса, содействие внедрению систем экологического менеджмента, распространение образцов лучшей практики, создание соответствующих финансовых инструментов.

Особое внимание следует уделять широкому внедрению экономических стимулов экологизации производства, которые объединены в блок финансово-экономический направлений, среди которых:

- налоговые льготы экологически ответственным производителям;
- налоговые вычеты при модернизации производства для содействия внедрению инноваций;
- особый режим амортизации экологических капиталовложений;
- льготные кредиты на покупку экологичного оборудования;
- специальные кредитные программы международных финансовых институтов;
- субсидирование процентной ставки по кредитам и займам на внедрение системы экологического менеджмента на предприятиях в соответствии со стандартом ISO 14001;

- организация системы зеленых государственных закупок для создания спроса на «зеленые» товары и услуги;
- ужесточение ответственности за нарушение экологического законодательства;
- увеличение налогов и сборов за использование энергоемких и углеродоемких технологий и других видов негативного воздействия на окружающую среду;
- предоставление «зеленых» грантов компаниям и населению на приобретение экологичных технологий и компенсацию части затрат на консультационные услуги и проведение экологического аудита;
- программы конвертации займов в гранты при условии демонстрации экологических достижений.

Как видно из достаточно длинного списка, фактически в арсенале у государства остаются все те же «кнут» и «пряник». В то же время исключительно «ограничительный» подход не способен ограничить дальнейшую деградацию экосистемы и может привести лишь к снижению экономической эффективности, а щедрое и даже необоснованное предоставление льгот и преференций отдельным компаниям также может негативно сказаться на конкурентоспособности в целом. В основном инициаторами экологических программ и внедрения инноваций являются крупные компании, но, создавая производственные цепочки, сотрудничая с предприятиями малого и среднего бизнеса, они оказывают содействие в реализации экологических мер. Они вкладывают средства в экологизацию мелких поставщиков, поскольку без этого невозможно достичь экологических целей крупной компании. Часто компании, особенно МСБ, не в полной мере владеют информацией о множестве финансово привлекательных возможностей совершенствования своих экологических показателей. Государству особо следует поощрять создание крупными компаниями партнерств с более мелкими поставщиками и обеспечивать общественное признание компаний, которые это делают (ОЭСР, 2016).

За каждым пунктом уже стоят практические примеры, реализованные проекты и наработанный опыт международных организаций и крупных компаний, которые должны быть досконально изучены, проанализированы сильные и слабые стороны и по возможности адаптированы на российскую практику (Green Econet).

Сегодня экономика России переживает нелёгкое время, очевиден факт необходимости диверсификации экономики и переход от «сырьевой» модели развития к принципам «зеленой» экономики, основанной на знаниях.

Любые коренные преобразования требуют существенных финансовых вложений, с длинным сроком окупаемости, и проблема поиска ресурсов встает на первое место. Особым примером для изучения стоит выделить опыт экологизации или экологической модернизации, успешно проведенной в Южной Кореи (Хуторова, 2013).

В условиях обострения геополитической напряженности и существенном ухудшении отношений с западными странами и рядом международных финансовых организаций, основная надежда остается на мобилизацию собственных ресурсов и развитие различных форм государственного-частного партнерства. В связи с этим именно средства Фонда национального благосостояния и специально созданных инвестиционных корпораций и банков развития могут стать финансовой основой экологизации экономической политики в условиях изменения климата, что приведет к качественному изменению роли России в мировой экономике.

Библиографический список

1. Climate Action Tracker. – 2016. – URL: http://climateactiontracker.org/countries/russianfederation.html.
2. Energy Press release. – URL: http://www.enerdata.net/enerdatauk/press-and-publication/energy-press-releases/2015-world-energy-trends.php.
3. Green econet. – URL: http:www.greeneconet.eu.
4. Климатическая повестка 2030. – URL: http://russiancouncil.ru/climate2030.

5. Ежегодный доклад ЮНЕП за 2015 год. Программа ООН по окружающей среде. 2016. – URL: http:// www.unep.org/publications
6. Ключевые показатели по 2016 году. Отчет международного энергетического агентства. – URL: http:// www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf
7. Курбанов Э.А. Лесоводство. Международное лесное хозяйство: учебное пособие / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев / Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. – 254 с.
8. Курбанов, Э.А. К вопросу об углерододепонирующих насаждениях / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьёв, Л.С. Мошкина и др. // Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – 2008. – № 3. – С. 5-17.
9. Мировая энергетическая статистика. Ежегодник 2016. – URL: https://yearbook.enerdata.net/energy-intensity -GDP-by-region.html.
10. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН Преобразование нашего мира. – URL: http://unctad.org/ meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1_ru.pdf.
11. Хуторова, Н.А. Экологическая модернизация - от теории к практике / Н.А. Хуторова // М.: МГУЛ. Лесной вестник. – 2013. – № 7. – С. 131-137.
12. Экологизация малых и средних предприятий: пособие по инструментам природоохранной политики для стран Восточного партнерства ЕС. – 2016. – URL: http://www.oecd.org/env/outreach/Greening-SMEs-policy-toolkit -rus.pdf.

УДК 630*232.32

ФИТОМАССА СЕЯНЦЕВ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЪЁМА ЯЧЕЕК КОНТЕЙНЕРА

М.И. Смышляева, В.Г. Краснов, А.В. Антропова, С.В. Кириллов
Поволжский государственный технологический университет

В статье рассматривается анализ фитомассы сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой в зависимости от объёма ячейки контейнера, используемого при выращивании растений. В настоящее время нет общепринятого мнения о том, какой объём ячейки контейнера должен быть для выращивания сеянцев дуба черешчатого. В ходе исследования определено влияние объёма ячейки на накопление фитомассы однолетних сеянцев дуба. Результаты показали, что средние показатели длины и ширины листьев дуба не зависят от объёма субстрата выращиваемых сеянцев. По мере увеличения объёма ячейки наблюдается увеличение количества листьев, что связано с большей площадью поверхности этих ячеек и увеличением освещения растений. Доказано влияние объёма ячейки на подземную часть, но не выявлено влияние этого фактора на высоту надземной части сеянцев.

Ключевые слова: *дуб черешчатый, сеянцы с закрытой корневой системой, фитомасса.*

PHYTOMASS PEDUNCULATE OAK (QUERCUS ROBUR L.) SEEDLINGS WITH CLOSED ROOT SYSTEM DEPENDING ON THE VOLUME CELL CONTAINER

M.I. Smyshlyaeva, V.G. Krasnov, A.V. Antropova, S.V. Kirillov
Volga State University of Technology

The article discusses the analysis of the biomass of seedlings of pedunculate oak with closed root system depending on the volume of the container of the cell used in the cultivation of plants. Currently, there are no generally accepted opinions about what volume of the cell container must be for growing seedlings of pedunculate oak. In the study, we determined the influence of cell volume on the accumulation of biomass of first-year oak seedlings. The results showed that the average length and width of oak leaves do not depend on the amount of substrate-grown seedlings. As you increase the volume of the cell, an increase in the number of leaves that is associated with the greater surface area of these cells and increased lighting plants. Proved the influence of cell volume on the underground part, but not the effect of this factor on the height of the aerial part of seedlings.

Keywords: *pedunculate oak, seedlings with closed root system, phytomass.*

В связи глобальным потеплением и изменением климата на Земле актуальным является сохранение и увеличение площадей лесов, выявления закономерностей их роста, особенностей накопления фитомассы основных древесных пород (Курбанов, 2010). Немаловажную роль при этом играет создание лесных культур.

Исскусственное лесовыращивание – это целый комплекс мероприятий, направленных в конечном результате на создание устойчивых и высокопродуктивных лесных насаждений. Все этапы данного комплекса важны, но, безусловно, особое место среди них занимает использование высококачественного стандартного посадочного материала. Также важное значение при восстановлении леса имеет хорошая развитость растения и фитомасса надземной и подземной частей сеянцев (Смышляева, 2015). Соотношение надземной и подземной фитомассы в разных растительных сообществах существенно различается и может меняться в зависимости от времени года. Характер и размеры накопления фитомассы зависят не только от условий обитания, но и от биологических особенностей растений (Курбанов и др., 2010). Так в настоящее время рассматривается наиболее перспективная технология создания посадочного материала – выращивание сеянцев и саженцев с закрытой корневой системой. Данный способ имеет широкое распространение в странах Европы, в США, а в последнее время и в России. Главным образом проработан вопрос производства контейнезированных сеянцев хвойных пород. В то же время выращивание лиственных пород, в том числе и дуба черешчатого с закрытыми корнями, для целей лесовосстановления в России исследовано недостаточно глубоко. В Соединенных Штатах Америки был проведен анализ исследований по влиянию различных типов контейнеров на рост сеянцев дуба с закрытой корневой системой. Группа ученых в 2005 году провела изучение влияния различных типов контейнеров на развитие корневой системы и рост дуба каменного (*Quercus ilex*) и дуба шариконосного (*Quercus coccifera*). Испытывали три типа кассет: «Paper-pot FS-615» (объем ячейки 482 см^3, высота 15 см), «Quick-pot T18» (объем ячейки 650 см^3, высота 18 см) и «Plantek 35F» (объем ячейки 275 см^3, высота 13 см) (Tsakaldimi, 2005).

Для обоих видов дуба более сильное развитие корневой системы и рост надземной части наблюдались при выращивании сеянцев в кассетах «Paper-pot FS 615», которые имели средние параметры по объему и высоте. Причин таких результатов не раскрывается. Единственное различие между кассетами «Paper-pot FS 615» и двумя другими исследованными, помимо их размеров, – это материал, из которого они изготовлены: бумага и твердый пластик соответственно. К сожалению, в работе не указано, как меняется густота выращивания сеянцев в зависимости от типа контейнера.

При сравнении биометрических параметров однолетних сеянцев дуба в кассетах «Quick-pot T18» и «Plantek 35F» можно отметить, что в последних они незначительно выше. Однако масса как надземной, так и подземной части сеянцев выше в кассетах «Quick-pot T18». Определенный интерес представляют данные о соотношении подземной и надземной частей растений. Теоретически, чем оно выше, тем более устойчиво растение к пересадке.

В данном исследовании наиболее крупные сеянцы, выращенные в кассетах «Paper-pot FS 615», имеют наименее развитую корневую систему (относительно потребностей надземной части), что может негативно повлиять на их приживаемость и сохранность. Лучше всего обеспечена корнями надземная часть сеянцев, выращенных в кассетах «Quick-pot T18». Несмотря на то, что их биометрические параметры хуже, чем в других вариантах, они соответствуют стандартным параметрам. Сеянцы, выращенные в контейнерах «Plantek 35F», также являются стандартными, а их маленький объём кома способствует экономии субстрата без особых потерь при последующем развитии сеянцев, что является экономически целесообразным для использования контейнеров с данными параметрами (Chirino, 2008). В России выращивание посадочного материала дуба черешчатого с закрытой корневой системой лишь набирает обороты.

Знание опыта зарубежных стран по устойчивому управлению лесами позволит российским специалистам в области лесного дела, экологии и природопользования более ответственно относиться к лесным ресурсам России и эффективно использовать их во благо настоящих и будущих поколений (Курбанов, 2014).

Цель данной работы - изучить влияние объёма ячеек контейнера на фитомассу сеянцев. **Задачи:** 1) определить среднее количество и параметры листьев сеянцев дуба в зависимости от объёма ячейки контейнера; 2) определить фитомассу частей сеянцев, выращенных в контейнерах с разными объёмами ячеек.

Формы и размеры листьев дуба черешчатого (Данилов, 1969) изменяются в зависимости от условий водоснабжения, освещения и возраста деревьев. Нами были изучены длина и ширина среднего листа, и сосчитано среднее количество листьев по каждому варианту (табл. 1).

Таблица 1

Среднее количество и параметры листьев сеянцев дуба черешчатого, выращенных в контейнерах с разным объёмом ячеек

Объём ячейки, $см^3$	Среднее количество листьев, шт.	Средняя длина листа, см	Средняя ширина листа, см
25	5	7,1±2,25	3,7±0,77
50	5	7,5±1,78	3,9±0,85
65	6	7,8±1,28	4±0,91
81	5	7,8±1,56	4,5±1,08
90	6	8±1,45	4,8±5,6
90	6	7,5±1,56	4,2±0,95
115	6	8,2±1,43	3,9±0,85
120	5	7,8±1,40	4,2±0,95
128	6	8,2±1,30	3,8±1,2
150	6	8,1±1,83	4±0,81
155	6	8±1,54	4±0,98
230	9	8±2,34	3,7±0,77
275	6	7,8±1,80	3,8±0,79
350	7	7,5±1,42	3,5±0,78
400	7	7,7±2,21	3,8±0,89
530	8	8,3±2,31	5,5±2,45

При выращивании сеянцев в тепличном комплексе условия освещения и полива для всех вариантов были схожими, поэтому параметры листьев не сильно варьируют в пределах вариантов, что можно проследить также по рисунку 1.

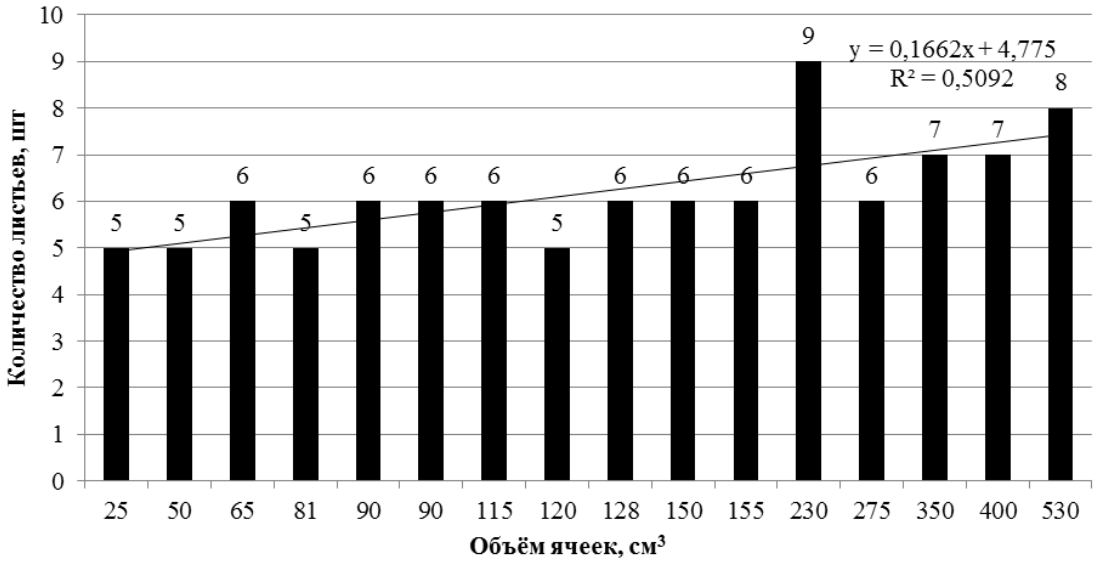


Рис. 1. Показатели количества листьев сеянцев по вариантам объёмов ячеек

Согласно рисунку с увеличением объёма ячеек прослеживается увеличение количества листьев сеянцев, что можно объяснить уменьшением количества ячеек на площади поверхности контейнера и увеличением открытого пространства для формирования большего количества листьев. Однако количество листьев не сильно варьирует в пределах вариантов и составляет в среднем 6-7 штук на сеянец.

Ширина листьев по вариантам варьирует от 3,5 см (350 см^3) до 5,5 см (530 см^3). Исходя из коэффициента регрессии (R^2=0,05), следует, что ширина листьев не зависит от объёма ячеек.

Было отмечено, что субстрат быстро высыхает на глубине до 4 см от уровня поверхности. Поглощающие корни (диаметром менее 1 мм), которые играют важную роль в развитии сеянцев дуба черешчатого, участвуя в процессе поглощения воды и обмене веществ с окружающей средой, страдают от кратковременного пересыхания субстрата.

Для того чтобы изучить влияние пересыхания верхнего слоя субстрата на рост сеянцев, нами была разработана методика изучения корневой системы сеянцев дуба черешчатого, согласно которой подземная часть сеянца длиной 4 см (ниже уровня субстрата) разделялась на отдельные части: подземную часть (ПЧ) (выше корневой шейки), участок К1 (ниже корневой шейки) и оставшуюся часть корня – К2. Полученные показатели фитомассы сеянцев представлены в таблице 2.

Таблица 2

Средние показатели фитомассы частей сеянцев, выращенных в контейнерах с разным объёмом ячеек (в пересчёте на 100 шт сеянцев)

Объём ячейки, см^3	Масса стволика, г.	Масса листьев, г.	Масса подземной части до корневой шейки, г.	Масса надземной части до корневой шейки, г.	Масса, К1, г		Масса К2, г		Масса подземной части сеянца, г	Соотношение надземной и подземной частей
					главный (крупные корни)	мелкие корни	главный (крупные корни)	мелкие корни		
25	6,90	5,34	6,45	**18,69**	9,84	1,50	7,36	0,64	**19,32**	1:1,0
50	12,30	9,23	9,06	**30,59**	15,84	3,49	9,31	1,80	**30,44**	1:1,0
65	13,98	10,37	10,81	**35,15**	15,38	3,07	6,48	1,03	**25,95**	1:0,7
81	16,01	9,48	12,27	**37,76**	18,08	5,00	10,19	3,32	**36,59**	1:1,0
90	16,26	11,15	13,13	**40,54**	17,53	3,11	13,49	2,66	**36,79**	1:0,9
90	14,05	14,44	9,44	**37,93**	18,51	3,37	11,23	2,23	**35,35**	1:0,9
115	16,79	12,02	13,79	**42,60**	21,13	4,85	10,07	2,30	**38,35**	1:0,9
120	14,56	9,74	10,07	**34,37**	19,31	2,51	17,95	2,65	**42,42**	1:1,2
128	13,75	10,50	10,79	**35,04**	14,19	4,46	15,54	4,39	**38,58**	1:1,1
150	13,94	11,77	14,12	**39,83**	18,77	3,89	20,37	5,81	**48,83**	1:1,2
155	15,69	12,63	14,52	**42,84**	17,55	3,40	19,00	5,23	**45,18**	1:1,1
230	15,19	16,30	14,58	**46,07**	19,85	5,24	15,20	6,91	**47,19**	1:1,0
275	14,50	11,30	16,07	**41,87**	16,86	4,73	27,39	9,27	**58,26**	1:1,4
350	13,88	12,05	14,77	**40,70**	17,59	6,52	15,58	7,79	**47,49**	1:1,2
400	14,82	12,88	14,44	**42,14**	16,08	4,11	35,51	10,75	**66,45**	1:1,6
530	14,49	12,13	13,87	**40,49**	16,94	2,54	53,30	14,71	**87,48**	1:2,2

Соотношение между надземной и подземной частями по массе сухого вещества варьирует от 1:0,7 (при объёме 65 см^3) до 1: 2,2 (при объёме 530 см^3).

Данные значения соотношений являются достаточно хорошими, так как корневая система при выращивании сеянцев с ЗКС формируется искусственным способом. Для сеянцев с ОКС (Яковлев, 1999) данное соотношение в оптимальном диапазоне должно составлять 1:1,7. Масса сухого вещества на участке К1 в среднем варьирует от 18,65 г (128 см^3) до 25,98 г (115 см^3) и не зависит от объёма ячейки. Большая часть данного участка находится в подземной

части сеянца, масса которой в большей степени зависит от глубины и способа посева. Участок К2 имеет прямую зависимость от объёма ячейки, так как при её увеличении формируется более мощная корневая система с множеством мелких корней (диаметром менее 1 мм).

В целом можно сделать вывод о том, что объём ячейки в значительной мере влияет на фитомассу подземной части сеянца и не оказывает сильного влияния на надземную часть.

Библиографический список

1. Chirino, E. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in Quercussuber L. seedlings for reforestation in Mediterranean climate / E. Chirino, A. Vilagrosa, E.I. Hernaŕndez, A. Matos, V.R. Vallejo // Forest Ecology and Management. – 2008. – № 256. – P. 779-785.
2. Tsakaldimi, M. Root morphology, stem growth and field performance of seedlings of two Mediterraneanevergreen oak species raised in different container types / M. Tsakaldimi, T. Zagas, T. Tsitsoni, P. Ganatsas // Plant and Soil. – 2005. – № 278. – P. 85-93.
3. Данилов, М.Д. Формовое разнообразие дуба черешчатого в условиях северо-восточной части его ареала и вопросы организации лесосеменного дела / М.Д. Данилов. – Йошкар-Ола, 1969. – 122 с.
4. Курбанов Э.А. Лесоводство. Международное лесное хозяйство: учебное пособие / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев // Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. – 254 с.
5. Курбанов, Э.А. Пространственная динамика фитомассы березняков на бывших сельскохозяйственных землях Марийского Заволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьёв, Л.С. Устюгова и др. // Лесной журнал. – Архангельск: Архангельский государственный технический университет. – 2010. – №3. – С. 8-14.
6. Смышляева, М.И. Выращивание сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой в условиях закрытого грунта / М. И. Смышляева // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: материалы Всерос. студ. конф. – Йошкар-Ола : ПГТУ, 2015. – Ч. 2. – С. 144-145.
7. Яковлев, А.С. Дубравы Среднего Поволжья: научное издание / А.С. Яковлев, И.А. Яковлев. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1999. – 352 с.

УДК 528.8

СОЗДАНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ И ПЛАНОВ ПО ДАННЫМ ИЗ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРОЕКТНОГО ИНСТИТУТА «КЫРГЫЗГИПРОЗЕМ»

А.К. Бектуров, К.Б. Ногойбаева
Кыргызский государственный университет строительства,
транспорта и архитектуры им. Н. Исанова

В статье отражен опыт применения беспилотного летательного аппарата проектного института «Кыргызгипрозем» для получения материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с целью создания цифровых топографических планов масштаба 1:2000 нового жилмассива в селе Новопавловка Сокулукского района. Намечены пути совершенствования применяемых комплексов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для получения материалов ДЗЗ в картографических целях. Обосновано, что простота в управлении БПЛА и качество, своевременность передаваемой с них в пункты управления информации подтверждают целесообразность выполнения проектным институтом требуемых работ по созданию топографических карт и планов.

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, аэрофотосъёмка, землеустройство, ортофотоплан, топографический план.*

CREATING THE TOPOGRAPHIC MAPS AND PLANS ACCORDING TO DATA FROM UNMANNED AERIAL VEHICLE OF PROJECT INSTITUTE "KYRGYZGIPROZEM"

A.K. Bekturov, K.B. Nogoybaeva
Kyrgyz State University of Construction,
Transport and of Architecture named after N. Isanov

The article represents the experience of pilotless plane application in order to receive the materials of remote sensing of the earth for the creation of digital topographic plan on a scale of 1:2

000 communities in the Novopavlovka village, rayon Sokuluk Kyrgyz Republic. There are outlined the ways of improvement of the complexes applying the pilotless planes in order to receive the materials of remote sensing of the earth for the cartographic purposes.

Keywords: *drone, aerial photography, land-device orthophotomap, topographic map.*

Состояние вопроса

Сегодня применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет существенно снизить затраты на производство аэрофотосъемочных работ. БПЛА могут нести разные цифровые приборы - от камер бытового сегмента до производящих ортофотопланы. Развитие цифровых методов фотограмметрической обработки уже привело к появлению программ и программных комплексов, способных обрабатывать даже такие «некачественные» данные аэрофотосъемки в высокоавтоматизированном режиме, при минимальном участии оператора. Одной из важных сфер использования БПЛА является картография. Для создания и обновления топографических карт традиционно использовались аэрофотоснимки. В последнее время в качестве базовой основы для топографического картографирования на первый план выходят снимки из беспилотных летательных аппаратов (Обиралов и др., 2002).

Преимущества и уникальность данной технологии для топографо-геодезического производства очевидны. Аэрофотосъемка с БПЛА используется для создания и обновления цифровых карт и планов тех территорий, для которых отсутствует практическая возможность или экономическая целесообразность детального изучения местности и определения числовых характеристик по космическим снимкам или материалам традиционной аэрофотосъемки, например, на участках:

- покрытых тенями и облаками на космических или традиционных аэрофотоснимках;
- изменений местности преимущественно с линейно-протяженными изменившимися объектами;
- изменений местности при точечной застройке в населенных пунктах;
- изменений местности, требующих оперативного анализа и принятия решений

Легкие блоки GPS позволяют БПЛА сделать пространственно-точные карты. Такие беспилотные аппараты могут быть использованы на местном уровне для создания карт вместо того, чтобы полагаться на государственные картографические органы. Они дополняют другие методы отображения и помогают заполнить пробелы, оставленные картированием с помощью спутниковых изображений и традиционной съемкой (Булавицкий, 2013).

В результате выполнения аэрофотосъемочных работ с применением БПЛА данные о пространственном размещении объектов местности заключены в обработанных изображениях. Эти данные могут быть применены для создания и обновления цифровых топографических карт (ЦТК) и цифровых топографических планов (ЦТП). Поэтому использование БПЛА является одним из наиболее развивающихся современных методов картографирования территории (Павлушенко и др., 2004).

Цель выполнения работ

В данной статье была рассмотрена возможность применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для получения аэрофотоснимков с целью создания топографических карт и оперативного мониторинга состояния распространения площади жилого массива с. Новопавловка.

Методика выполнения работ

Работа выполнена на примере применения БПЛА при топографической съёмке масштаба 1:2000 для определения площади и проведения землеустроительных работ на территории нового жилого массива в с. Новопавловка Сокулукского района. Исходными данными в этой работе стали аэрофотоснимки, полученные с беспилотного летательного аппарата (БПЛА)

государственного проектного института ГПИ «Кыргызгипрозем». Технологическая схема, применяемая в проектном институте «Кыргызгипрозем» при создании цифровых топографических планов масштаба 1:2000, приведена на рисунке 1.

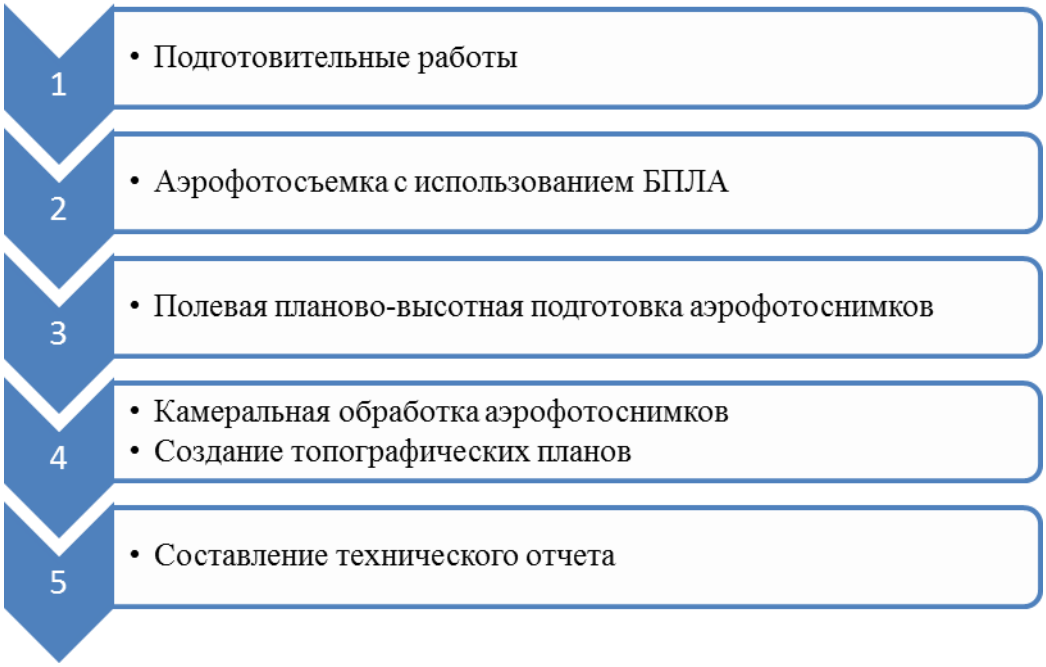


Рис. 1. Технологическая схема выполнения работ при создании цифровых топографических планов

Выполнение аэрокосмических работ выполнялось комплексом площадной съёмки (КПС), в состав которого входит:

- наземная опорная станция, смонтированная вблизи запуска БПЛА;
- беспилотный летательный аппарат (БПЛА).

Основные технические характеристики комплекса площадной съёмки и основные технические характеристики БПЛА приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Основные технические характеристики комплекса площадной съёмки

Время развертывания комплекса	1 час
Радиус применения БПЛА	10 км
Максимальное нахождение БПЛА в воздухе	60 мин.
Время непрерывной работы	7 часов
Обслуживающий персонал	3 человека

Таблица 2

Основные технические характеристики БПЛА

Размах крыльев (м)	2,1 м
Длина фюзеляжа (м)	1,4 м
Вес полетный (кг)	до 5,5 кг
Вес полетной нагрузки (кг)	0,5 кг
Управление полетом	ручной и автоматический режимы
Управление камеры	автоматическое
Скорость полета (макс./крейсерская) (км/ч)	100/50
Силовая установка	электродвигатель 600 Вт
Способ старта	с катапульты
Способ посадки	на парашюте
Время подготовки к повторному полету (мин.)	10 мин.

1. Подготовительные этапы работы включали в себя:

- изучение имеющихся материалов; формирование или сбор требований к материалам, которые нужно получить по результатам съемки – тип и масштаб карты, границы объекта съемки; приведение их в соответствие с техническими требованиями к съемочным материалам: разрешение, координаты контура участка съемки, перекрытие снимков, точность определения координат центров фотографирования, требования к наземной опорной сети;
- формирование полетного задания для БПЛА. Выполняется программой – планировщиком полета, входящей в состав комплекса. Оператор должен выбрать используемый комплекс БПЛА (в случае, если программа позволяет работать с несколькими конфигурациями БПЛА и фотоаппаратуры), задать на карте контур участка съемки и примерное положение стартовой площадки, установить требуемое разрешение и перекрытие, после чего программа рассчитывает план полета и проверяет его выполнимость (Инструкция по фотограмметрическим работам …, 2002).

БПЛА имеет цифровую камеру SONYA5000 с разрешением 300 пикселей, размером кадра 24 х 63 мм и фокусом f = 35 мм. Схема комплекса наземной съемки (КНС) показана на рисунке 2.

Рис. 2. Функциональная схема комплекса наземной съемки

Кроме того, составлен проект работ и проведён расчет параметров аэрофотосъемки. С учетом высоты полета 300-400 метров.

2. Аэрофотосъемка с использованием БПЛА

Камера при выполнении съемки ориентируется вдоль ее маршрутов. Время интервала съемки фотокамеры 11,7 с при крейсерской скорости беспилотного летательного аппарата 50 км/ч. С учетом конфигурации участка съемки, рассчитанных параметров аэрофотосъёмки, на космическом снимке масштаба 1:25000 были проложены маршруты (29 маршрутов), с помощью GPS приемников получены координаты начала и конца каждого маршрута.

Все координаты местности, используемые в программе полета БПЛА, приведены в пространственной системе координат WGS-84.

Схема маршрутов полета беспилотного летательного аппарата показана на рисунке 3.

Подготовительный период работы включал в себя работы по рекогносцировке местности с целью определения расположения участка местности для стартово-посадочной площадки (СПП) и расположения станции наземного управления.

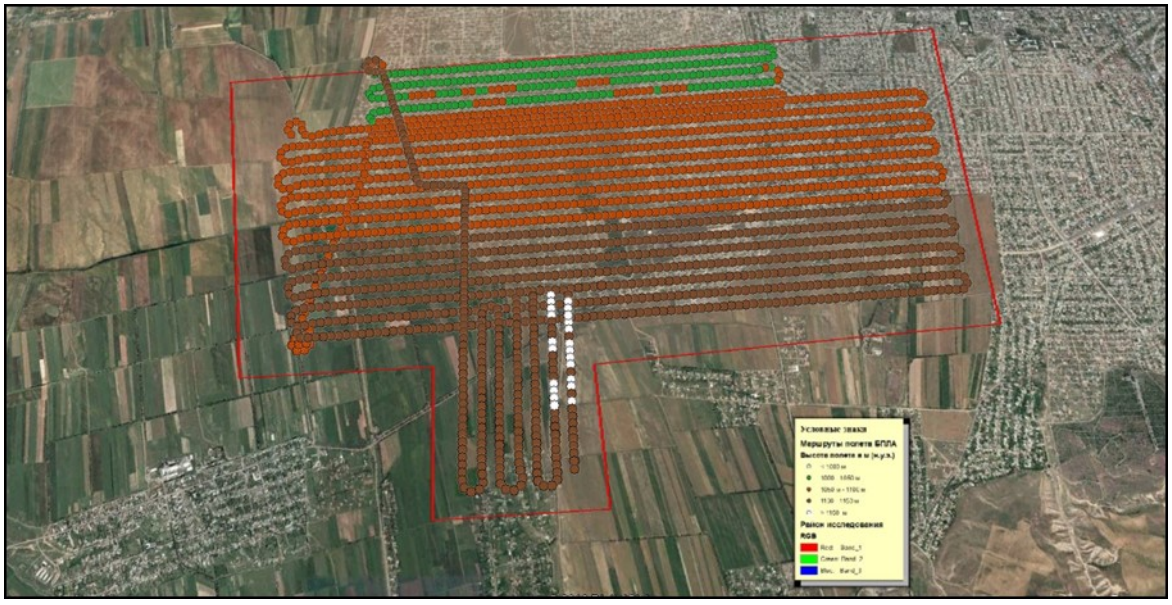


Рис. 3. Схема маршрутов полета беспилотного летательного аппарата

Для предварительного изучения объекта аэрофотосъемки использовались космоснимки с хорошей детализацией. Расчеты параметров аэрофотосъёмки и прокладка его маршрутов выполнены в программе ПО Agisoft Photo Scan.

Исходя из требований для составления картографического плана по результатам аэрофотосъемки были рассчитаны следующие параметры местности: высота – 810-890 м над уровнем эллипсоида, площадь объекта 44,75 кв. км, количество маршрутов полета – 29.

Оценка метеоусловий выполнялась за час до планируемого выезда мобильной группы (предварительная оценка), а также по прибытии мобильной группы в район работ непосредственно перед развертыванием комплекса площадной съёмки по фактической погоде (предварительная оценка).

Управление беспилотным летательным аппаратом осуществлялось в автоматическом режиме. Постоянно оценивалась телеметрическая информация на мониторе ноутбука (курс, скорость, высота, ветер, угол сноса, температура окружающего воздуха, расходный ток, точность определения местоположения по GPS, мощность сигнала радиоуправления и др.). После набора высоты 1050 м над уровнем эллипсоида беспилотный летательный аппарат был сбалансирован для работы на заданной высоте, выведен в точку начала аэросъемки и начата съёмка. Для выполнения полета по маршрутам аэрофотосъёмки, набора высоты и снижения потребовалось 56 минут полетного времени. В процессе выполнения полетного задания техник-наблюдатель, используя бинокль, постоянно наблюдал за БПЛА, а также следил за воздушными и погодными условиями в районе полетов.

3. Полевая подготовка аэрофотоснимков

После окончания аэрофотосъёмки и посадки беспилотного летательного аппарата фотоснимки были скопированы с карты памяти цифрового фотоаппарата в базу геоданных, которая была установлена на ноутбуке. Далее был выполнен накидной монтаж полученных цифровых фотоснимков. При создании накидного монтажа каждый кадр изображения отобразился на электронной карте. Расположения кадра на карте и его масштаб определяются координатами центральной точки кадра, углом азимута и высотой, полученными в момент съемки бортового GPS-приемника.

По результатам создания накидного монтажа, оценивались следующие параметры:

- наличие пропусков кадров в маршруте (пропущенным считается кадр, если продольное перекрытие смежных кадров меньше заданного);
- отклонение масштаба кадров изображений от заданного (не более 5 %);

- продольное и поперечное перекрытие кадров;
- прямолинейность маршрутов.

По результатам анализа накидного монтажа дальнейшее проведение аэрофотосъемочных работ (дополнительная аэрофотосъемка местности) не потребовалось (рис. 4).

Рис. 4. Фрагмент репродукции накидного монтажа

По результатам анализа накидного монтажа программой аэрофотосъемочных расчетов был сформирован отчет в виде формализованного документа, который вместе с материалами аэрофотосъемки был приложен к акту выполненных работ для передачи в подразделение, осуществляющее фотограмметрические работы.

При входном контроле камеральной обработки аэрофотосъемочных материалов проверялись следующие требования:

- покрытие аэрофотоснимками территории съемки;
- соответствие материалов аэросъемки техническим требованиям нормативных документов;
- качество изображения аэрофотоснимков.

В результате было установлено, что материалы аэрофотосъемки полностью покрывают территорию съемки, что соответствует техническому заданию и проекту аэрофотосъемочных работ. Запроектированные маршруты в целом проложены по запроектированным трекам.

К сожалению, из-за сноса БПЛА и так называемого «рысканья» в процессе полета снимки на нескольких маршрутах имели отклонения до 70°. Поэтому было принято решение такие снимки исключить из процесса дальнейших работ.

Учитывая, что данный участок изменился за последние 5 лет, мы также с помощью программы GoogleEarth сделали сравнительный анализ. В итоге материалы аэрофотосъемки были использованы для изготовления ортофотопланов (рис. 5).

4. Дешифрирование и камеральная обработка аэрофотоснимков

Дешифрирование ортофотопланов производилось одновременно с цифрованием распознаваемых объектов на фотограмметрических станциях камеральным способом. При дешифрировании использовались как справочный материал карты масштаба 1:25000 прошлых лет съемки (рис. 6).

5. Подготовка технического отчета

После проведения вышеуказанных работ сотрудниками кафедры был подготовлен технический отчет, который отражал следующие сведения:

- сроки проведения работ; границы района (координаты вершин многоугольника, ограничивающего район работ);
- фокусное расстояние объектива и характеристики матрицы прибора с зарядовой связью (ПЗС) цифровой камеры;
- допустимый диапазон высот аэрофотосъемки;

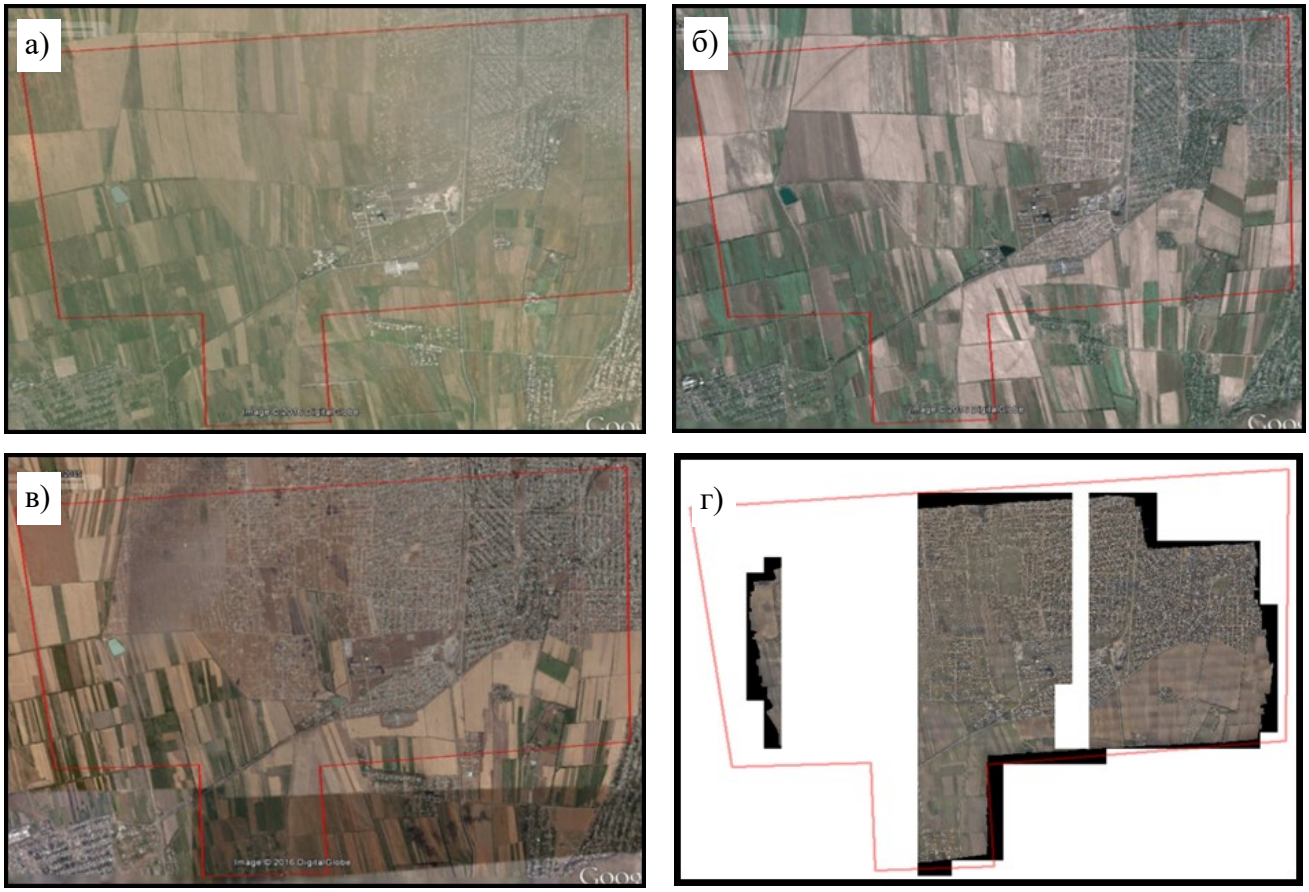


Рис. 5. Фрагменты снимков территории исследования: а) космоснимок Google, полученный 03.03.2007 г., б) космоснимок Google (16.08. 2009 г.), в) космоснимок Google (12.08.2015 г.), г) снимок, полученный с БПЛА (3.03.2016 г.)

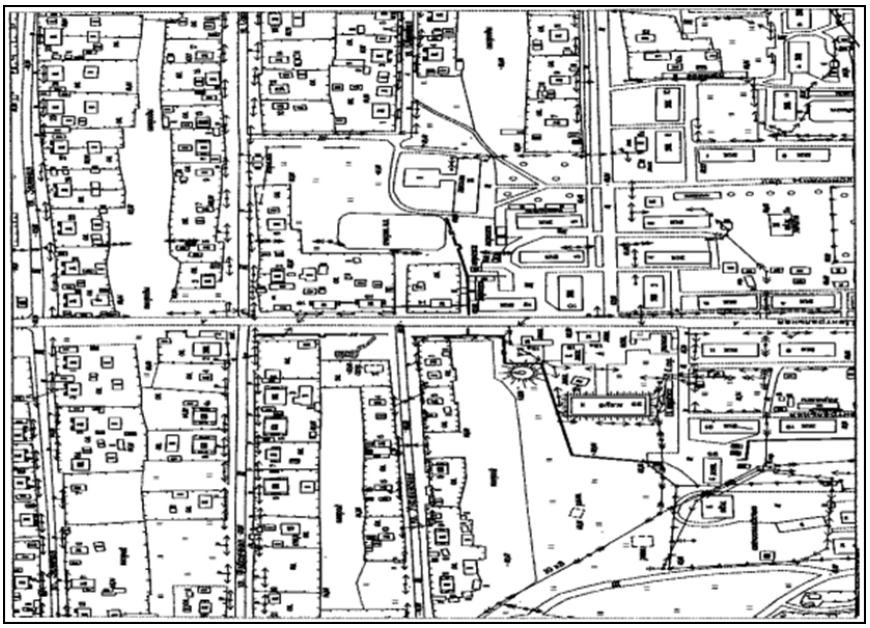


Рис. 6. Фрагмент плана на участок жилого массива в селе Новопавловка

- рекомендуемое местное время проведения аэрофотосъемки;
- масштаб созданного цифрового топографического плана.

Созданные цифровые топографические планы на данный момент используются на кафедре «Геодезия и геоинформатика» Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова в качестве учебного материала по дисци-

плине «Геоинформационные системы» для студентов направления «Геодезия и дистанционное зондирования.

Выводы

Опыт применения БПЛА проектного института для получения материалов дистанционного зондирования Земли показал, что имеющиеся на предприятии комплекс БПЛА необходимо оснастить профессиональным гироскопом и процессором, управляющим полезной нагрузкой и энергонезависимой памятью.

И если учитывать все вышеперечисленные недостатки, то имеющийся в проектном институте БПЛА позволяет сделать вывод о возможности применения такого рода летательных аппаратов государственными и частными органами по созданию карт Кыргызской Республики для ведения съемки особенно в труднодоступных (недоступных) районах.

Библиографический список

1. Булавицкий, В.Ф. Применение беспилотных летательных аппаратов для оперативного получения аэроснимков местности / В.Ф. Булавицкий // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. – Т. 4. – №4. – С. 1747-1755.
2. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. – Москва : ЦНИИГАиК, 2002.
3. Обиралов, А.И. Фотограмметрия / А.И. Обиралов, А.Н. Лимонов, Л.А. Гаврилова. – М.: Колосс, 2002. – 240 с.
4. Павлушенко, М. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, распространение и перспективы развития / М. Павлушенко, Г. Евстафьев, И. Макаренко. – М.: Права человека. – 2005. – 612 с.

УДК 630*587.6

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗЕЛЕНЫХ НАСАЖДЕНИЙ Г. ЙОШКАР-ОЛЫ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ

Л.Н. Смирнова
Поволжский государственный технологический университет

Описываются степень изменений и тенденции пространственного распределения зеленых насаждений на примере г. Йошкар-Олы за период 1989-2015 гг. Для оценки изменений использованы спутниковые снимки Landsat среднего разрешения. Методы классификации изображений с визуальным дешифрированием объединены для оценки точности тематических карт. Рассматривается анализ современных методик оценки состояния и пространственного распределения зеленых насаждений с использованием основных пространственных индексов. Исследованы различные подходы к осуществлению мониторинга зеленых насаждений с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Созданы тематические карты разновременных спутниковых снимков. Анализ полученных разновременных тематических карт на территорию г. Йошкар-Олы показал неоднородность структуры ее зеленых насаждений. Полученные данные свидетельствуют о том, что за последние 26 лет на территории исследований наблюдается увеличение фрагментированности участков зеленых насаждений, и происходит существенное сокращение класса мелколиственных насаждений с 1687,1 га до 1376,5 га. Проведена оценка экологического состояния по интегральным показателям зеленых насаждений г. Йошкар-Олы. Интегральный показатель экологического состояния зеленых насаждений показал снижение экологического состояния в 2015 году по отношению к 1989 году, что можно объяснить расширением точечной застройки г. Йошкар-Ола. Предложенный метод тематического картирования и оценки зеленых насаждений методами дистанционного зондирования по пространственным показателям позволит сократить стоимость работ в сравнении с наземными исследованиями и повысить их точность. Результаты исследования могут быть использованы при осуществлении экологического мониторинга зеленых насаждений методами дистанционного зондирования.

Ключевые слова: *зеленые насаждения, пространственное распределение, спутниковые снимки, дистанционное зондирование, тематическая карта, экологическая устойчивость территории*

ECOLOGICAL MONITORING OF URBAN FORESTS OF YOSHKAR-OLA BY SATELLITE IMAGES

L.N. Smirnova
Volga State University of Technology

The degree of changes and trends in the spatial distribution of green space on the example of Yoshkar-Ola city for the period 1989-2015 years is described in the article. Satellite images Landsat of medium resolution were used for measurement of changes. Classification methods of images with visual interpretation are merged to evaluate the thematic maps accuracy. The modern methods analysis of state assessment and spatial distribution of green space with use of major spatial indexes is considered in the article. Different approaches to the monitoring of green space, using remote sensing data, have been investigated. Thematic maps of multi-temporal satellite images were created. The analysis of obtained thematic maps at different times in the city of Yoshkar-Ola showed inhomogeneity of the structure of its green space. The data suggests that in the last 26 years on the research territory, there is an increase in fragmentation of green space, and there is a significant decline in the class of small-leaved plants from 1687.1 to 1376.5 hectares. Ecological state on integral indicators of green spaces of Yoshkar-Ola city is evaluated. Integral indicator of the ecological state of green plantations showed a decrease of ecological stateof green space in 2015 relative to 1989, which can be attributed to the expansion of infill construction of Yoshkar-Ola city. Proposed method of thematic mapping and evaluation of green spaces with the use of remote sensing techniques on spatial indexes will allow to reduce the cost of work in comparison to land-based researches and improve their accuracy. The research results can be used in the ecological monitoring of green spaces, using remote sensing techniques.

Keywords*: urban forests, spatial distribution, remote sensing, thematic map, ecological sustainability of territory*

Введение

Оценка экологического состояния городов требует постоянного мониторинга последствий процесса урбанизации и влияния техногенных факторов на окружающую среду. Поэтому оперативный мониторинг динамики зеленых насаждений урбанизированных территорий важен при разработке своевременных и эффективных мер по охране окружающей среды в городских условиях (Курбанов и др., 2011; Воробьев и др., 2015).

Обеспечение объективной информации о состоянии и динамике лесных экосистем на обширных площадях наиболее эффективно может быть реализовано на основе аэрокосмических методов мониторинга земной поверхности (Барталев и др., 2015; Курбанов и др., 2014). Современные данные дистанционного зондирования находят свое применение в различных областях лесного хозяйства. К ним относятся изучение лесных экосистем, инвентаризация и картографирование лесов, регистрация текущих изменений в лесном фонде, анализ долгосрочной динамики лесного покрова, оценка соблюдения правил рубок главного пользования, состояния лесовозобновления на вырубках, состояния насаждений в зоне промышленного загрязнения (Малышева, 2002; Курбанов и др., 2010).

Очевидна целесообразность использования современных научно-прикладных исследований и принятие решений по устойчивому ведению лесного хозяйства на новый технологический уровень с использованием геоинформационных систем и данных ДДЗ (Kathleen et al., 2007; Курбанов и др., 2015). Дистанционное зондирование обеспечивает временные и про-

странственные тренды в исследовании растительного покрова, которые необходимы при моделировании и планировании, при застройке территории города (Курбанов и др., 2016).

За последние четыре десятилетия данные мультиспектральных изображений с использованием дистанционного зондирования стали основным источником информации о пространственных и временных изменениях лесо- и землепользования (Курбанов и др., 2013; Ji and Wylie, 2015; Russel et al., 2015; Хлюстов, Лямеборшай, 2014). Геоинформационные технологии и дистанционное зондирование Земли широко используют при оценке и мониторинге городских лесов во многих странах мира. В США по разновременным спутниковым снимкам Landsat на основе семи тематических классов методом общей классификации и постклассификационного выявления изменений (change detection) была получена карта динамики городских лесов нескольких городов штата Миннесота (Yuan et al., 2005). Литературный анализ по картированию растительного покрова показывает, что существуют большие расхождения между различными исследованиями, а валидация данных на региональном уровне остается важным моментом для оценки точности карт растительности (Xi et al., 2008; Воробьев, Курбанов, 2015). Российская Федерация является одним из регионов с большими расхождениями в глобальных оценках земной поверхности и растительного покрова (Kathleen et al., 2007; Loboda et al., 2012).

Несмотря на рост методов по распознаванию наземного покрова, производство точных карт изменений в региональном земле- и лесопользовании остается сложным вопросом (Heywood et al, 2006). Интересным направлением использования данных дистанционного зондирования является оценка фрагментированности зеленых насаждений, что позволяет судить об устойчивости экосистем и их биоразнообразии. Важными количественными показателями при оценке фрагментированности объектов выступают: количество фрагментов, их средняя площадь и размеры границ. Сезонная вариация значений NDVI MODIS показывает тесную корреляцию с данными о нарушенности зеленых насаждений. Индекс NDVI был успешно применен для дешифрирования урбанизированных территорий и оценки состава лесов России (Харин и др., 2006).

Наметившаяся тенденция последних лет отчуждения земель в пользу объектов городской застройки снижает показатель обеспеченности жителей города территориями зеленых насаждений. В городе ощущается нехватка зеленых насаждений общего пользования, к которым относятся парки, скверы, бульвары, насаждения на улицах, при административных и общественных учреждениях. Всегда актуальным является вопрос экологического состояния зеленых насаждений городского округа города Йошкар-Ола.

Цель исследования – экологический мониторинг зеленых насаждений городского округа г. Йошкар-Ола с использованием спутниковых данных. Для выполнения этой цели были решены следующие **задачи:**

- подобраны спутниковые снимки среднего и высокого разрешения на территорию исследования за период 1989-2015 гг.;
- заложены тестовые участки на исследуемой территории;
- проведены камеральные исследования с анализом тематического картирования динамики зеленых насаждений и зон застройки городского округа г. Йошкар-Ола;
- проведена оценка влияния градостроительства на зеленые насаждения городского округа г. Йошкар-Ола;
- определен интегральный показатель степени экологической устойчивости пространственной структуры городского округа г. Йошкар-Ола.

Объектом исследования явились зеленые насаждения, произрастающие на территории г. Йошкар-Олы, который является одним из самых зеленых городов России. Зеленые насаждения являются частью городской инфраструктуры и экологическим каркасом его тер-

ритории. Они входят в единую систему взаимосвязанных элементов ландшафта города и прилегающего Медведевского района. По официальным данным территория Йошкар-Олы составляет 10 тыс. га. Население города в 2015 году составляло 263190 человек (Публичная кадастровая карта, 2015). Общая площадь всех зеленых массивов и насаждений достигает 1607,6 га, из них 801 га – городские леса (Сосновая роща, Дубовая роща и другие), для которых введен статус особо охраняемых природных территорий. Муниципальные городские леса г. Йошкар-Олы представляют собой высокопродуктивные насаждения смешанного породного состава и возраста, типологической структуры и отвечают требованиям организации многофункционального рекреационного лесопользования. Наиболее высокой рекреационной нагрузке подвержены участки зеленых насаждений, расположенные в непосредственной близости от городской застройки транспортных коридоров (Общая характеристика РМЭ, 2012).

Методика исследований

На сегодняшний день для долгосрочного мониторинга зеленых насаждений наиболее приемлемыми являются спутниковые снимки системы «Landsat», которые представляют собой универсальные данные для изучения глобальных изменений, наблюдения за поверхностью Земли и картирования больших площадей растительного покрова (Губаев и др., 2011; Курбанов и др., 2014). Для оценки изменений зеленых насаждений в пределах границ городского округа были использованы безоблачные спутниковые снимки Landsat 1989 и 2015 гг., полностью покрывающие территорию исследования.

При проведении мониторинга с использованием разновременных спутниковых данных используется комплексный подход, предусматривающий последовательность определенных процедур по работе со спутниковыми изображениями и по оценке точности тематического картирования. Для анализа изменений в растительном покрове на территории исследования проводится предварительная подготовка маршрута для полевых работ по закладке тестовых участков. Для этого также используется вся априорная информация, включая фотографии городской инфраструктуры, публикации по исследуемой теме, доступные снимки высокого пространственного разрешения, интернет-ресурсы: Google Earth, Яндекс карты и др. Тестовые участки, заложенные в местах произрастания зеленой растительности и потенциальной городской застройки, были привязаны на местности с помощью GPS приемника и идентифицированы на спутниковых снимках Landsat 2015 г. Растительный покров на тестовых участках оценивался визуально: по породному составу и возрастной структуре, задернению (многолетние травы), степени проективного покрытия, состоянию. На местности также оценивалась степень антропогенной нарушенности (строительные работы, участки застройки, захламленность территории и т.п.). Все спутниковые снимки прошли атмосферную (Atmospheric Correction) и геометрическую коррекцию в программном комплексе ENVI-5.2. При проведении анализа и оценки результатов классификации спутниковых снимков также использовались данные коллектива «Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов» ФГБОУ ВО «ПГТУ». Оба спутниковых снимка Landsat прошли процедуру неуправляемой классификации методом ISODATA.

Методика исследований также включала в себя использование следующих показателей: коэффициента экологической устойчивости территории, индекса Шеннона, индекса темпа роста города и интегрального индекса состояния города (Карев и др., 2007; Kumar et al., 2007; Шарая и др., 2013).

Используя методику В.Б. Карева и Н.Т. Кавешникова (2007), для расчета экологической устойчивости региональной территории к элементам положительного воздействия на окружающую среду отнесены леса, особо охраняемые природные территории (ООПТ) и водные объекты. К элементам отрицательного воздействия на окружающую среду отнесены жилые зоны, сельскохозяйственные территории, заболоченные участки. В работе определение коэффициента экологической устойчивости (Кэут) проводится по формуле

$$Кэут1 = \frac{\sum S_{ni}}{\sum S_{mj}}\ , \quad (1)$$

где S_{ni} – площади, занимаемые элементами положительного *i*-го воздействия на среду (км^2 или га); S_{mj} – отрицательного *j*-го воздействия (км^2 или га).

Кэут2 определяется с учетом внутренних свойств и качественного влияния этих зон по формуле:

$$Кэут2 = \frac{\sum S_j \times K_{эj} \times K_{гм}}{\sum S_o}\ , \quad (2)$$

где S_j - площадь, занятая *j*-м элементом; $K_{эj}$ - коэффициент, характеризующий экологическое значение *j* - го элемента на среду; $K_{гм}$ - коэффициент геолого-морфологической устойчивости рельефа (при расчетах принимается равным 1,0 для стабильного и 0,7 для нестабильного рельефа); S_o - площадь всей территории.

Энтропия Шеннона является популярным и важным показателем для выявления компактности городской застройки и дисперсии роста городов. В нашей работе метод энтропии Шеннона был применен для выявления количественной оценки и изменения городской застройки в районе исследования. Значения абсолютной энтропии Шеннона (H) были определены по уравнению

$$H = -\sum_{i=1}^{N} Pi \times lnPi\ , \quad (3)$$

где P_i- процент переменной в *i*-й зоне**,** т.е. процент застроенных земель в каждом районе.

Согласно общепринятой методике Л.С. Шарая (2013) в работе был использован интегральный показатель состояния развития города. Для этого была сформирована экологическая шкала с использованием спутниковых данных (табл.1).

Таблица 1

Экологическая шкала по данным ДЗЗ за исследуемый период

Показатели	Вес показателя	1989			2015		
		Значение	Балл	Интегральный показатель	Значение	Балл	Интегральный показатель
Лесистость территории, %	0,35	20,3	1	0,4	17,3	1	0,4
Индекс Шеннона	0,15	1,31	3	0,5	1,36	3	0,5
Кэут1 (оценка коэффициента территории)	0,1	2,01	2	0,2	1,21	2	0,2
Кэут2 (с учетом внутренних свойств и качественного состояния территории)	0,1	0,11	0	0,0	0,10	0	0,0
Площадь застройки, %	0,2	10,07	3	0,6	14,26	2	0,4
Фрагментированность	0,1	средняя	1	0,1	сильная	0	0,0
Интегральный показатель состояния развития города	**1**			**1,8**			**1,5**

Для оценки интенсивности темпа роста города (annual urban growth rate, AGR) использовалось следующее уравнение:

$$ARG = \frac{UA_{n+i} - UA_i}{nTA_{n+i}} \times 100\%\ , \quad (4)$$

где nTA_{n+1} – общая площадь исследуемой области в момент времени $n+i$, UA_{n+1} и UA_i - площадь жилой застройки в моменты времени $n+i$ и i соответственно, n – временной интервал (в годах), за который проводились вычисления.

Оценка экологического состояния города осуществлялась на основании пространственных индексов, для каждого из которых приведены адаптированные критерии, позволяющие

оценить степень их влияния на экологическое состояние объектов исследования (Дмитриев, 2009). Полевая проверка (валидация) полученных тематических карт проводилась на основе тестовых участков (Курбанов, Воробьев, 2015).

Результаты

Кэут1 города Йошкар-Олы с учетом площадей различных зон в 1989 году составил 2, а в 2015 – 1,2. Полученные значения коэффициента указывают на условно стабильное состояние изучаемой территории. Кэут2 г. Йошкар-Олы с учетом характеристик внутренних свойств и качественного состояния элементов территории в 1989 году составил 0,12, а в 2015 году – 0,10. То есть территория города характеризуется нестабильной устойчивостью, что связано с площадью территории и ее антропогенной нагрузкой. На территории города наблюдается расширение площади точечной застройки, а также разрастание районов с антропогенной нагрузкой.

Вновь полученные карты экологического состояния территории г. Йошкар-Олы по районам и в целом позволили определить значения интегрального показателя состояния города по районам. Неуправляемая пошаговая классификация на основе разновременных снимков Landsat 1989 и 2015 гг. позволила выявить динамику растительного покрова и зон застройки города Йошкар-Олы (рис. 1).

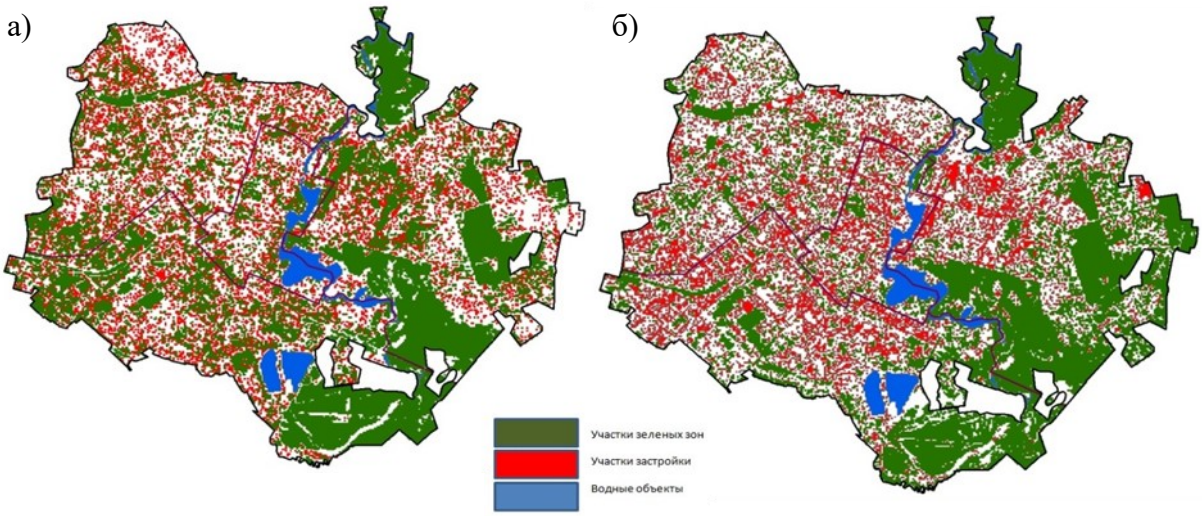


Рис.1. Тематические карты пространственного распределения зеленых зон и зон застройки на территории городского округа: а) 1989 и б) 2015 гг.

Анализ полученных тематических карт показывает, что с 1989 года по настоящее время наблюдается небольшое снижение площади зеленых насаждений в г. Йошкар-Оле. Детальный анализ тематических карт зеленых насаждений города выявил незначительные изменения в площади смешанных лесов с 183,8 до 167,8 га (рис. 2).

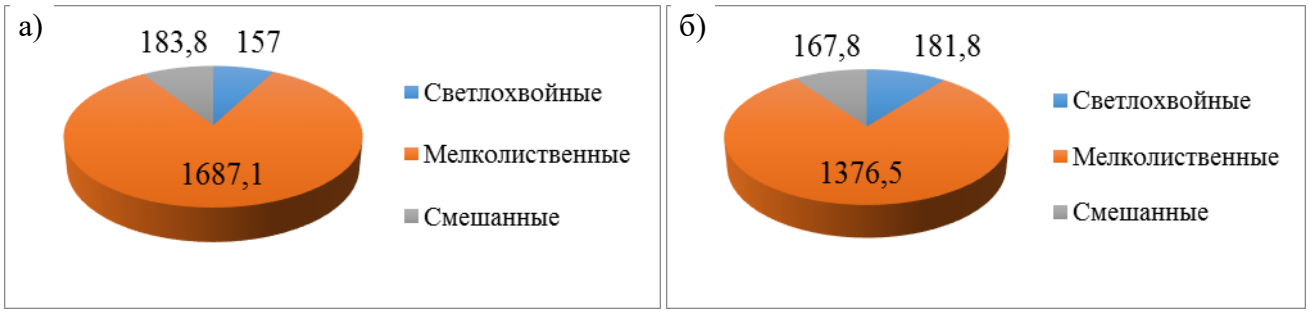


Рис. 2. Динамика площадей зеленых насаждений по породному составу, расположенных на территории г. Йошкар-Олы: а) 1989 г., б) 2015 г.

В то же время наблюдается существенное сокращение площади мелколиственных насаждений с 1687,1 до 1376,5 га. На месте этих участков городской зоны были построены различные объекты и сооружения. Об этом также свидетельствует увеличение площади застройки с 1007,6 до 1426,4 га за исследуемый период.

По районам городского округа наблюдается различная картина динамики площадей зеленых насаждений, которая характерна для небольших городов Российской Федерации. В целом наблюдается относительно неизменная площадь участков зеленых насаждений в центральной части города (рис. 3).

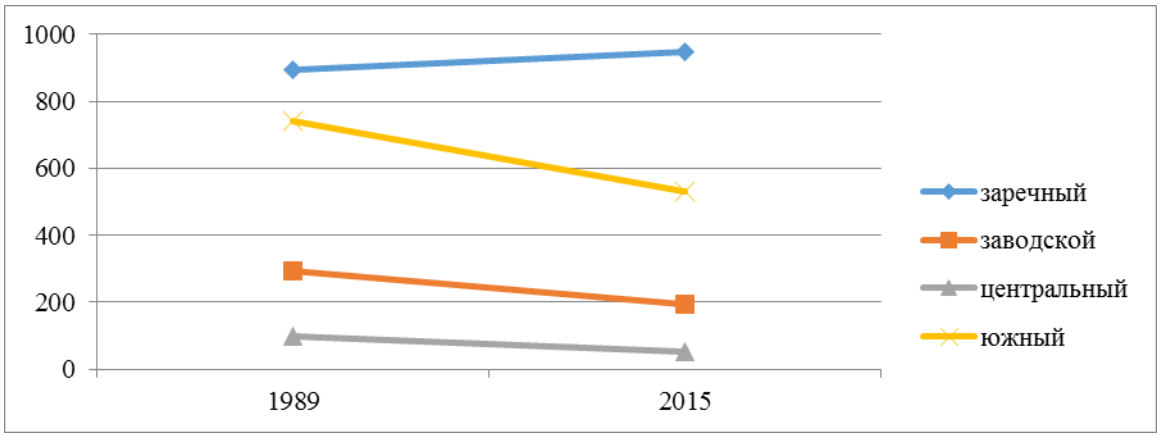


Рис. 3. Динамика площадей зеленых насаждений по различным районам г. Йошкар-Олы

Развернувшееся за последнее десятилетие интенсивное строительство вдоль набережной зоны реки Малая Кокшага и вокруг нее не повлияло на общую картину ландшафта центральной части города ввиду отсутствия полноценных зеленых насаждений вдоль береговой полосы и прилегающей территории, которые необходимо было вырубить в связи со строительными работами (рис. 4).

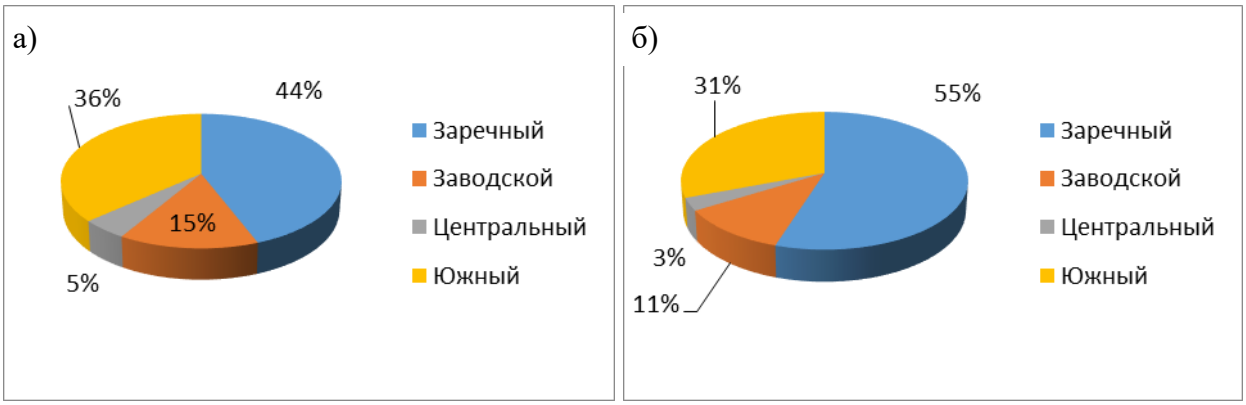


Рис. 4. Площади зеленых насаждений (процент лесистости) по районам г. Йошкар-Олы: а) 1989 г., б) 2015 г.

Другая картина наблюдается в периферийной части городского округа. Исследование выявило потери зеленых насаждений в южном промышленном и заводском районах (рис. 5,6). Это может быть связано с интенсивным строительством жилья, включая индивидуальную застройку, которая проводится на этой территории последние 20 лет (рис. 5).

Основные потери зеленых насаждений в заречной части города наблюдаются вдоль береговой линии реки Малая Кокшага (рис. 6).

Между тем в заречном районе наблюдается незначительное увеличение площади зеленых насаждений, что может быть связано с сукцессионными процессами на заброшенных землях (Курбанов и др., 2010). Естественные процессы зарастания земель запаса и перераспределения лесной растительности продолжаются в Республике Марий Эл уже второе десятилетие.

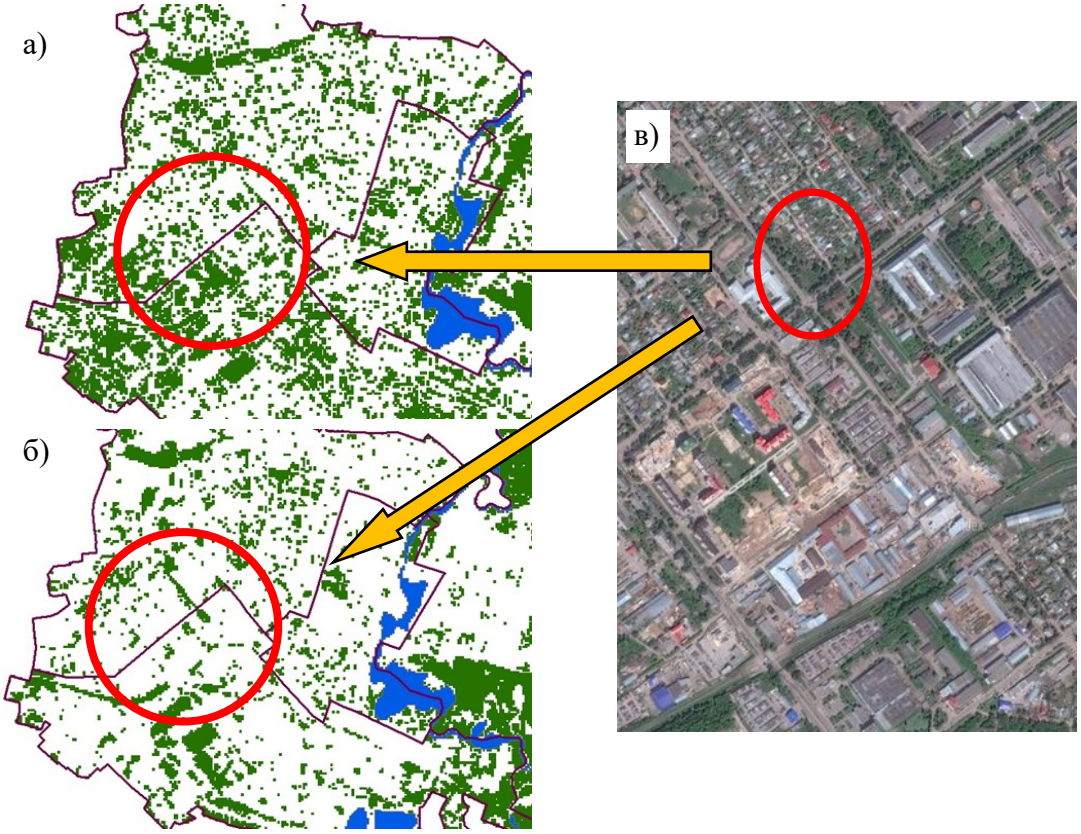


Рис. 5. Мониторинг площади зеленых насаждений в Заводском районе за период с 1989 по 2015 гг.: а) карта зеленых насаждений 1989 г.; б) карта зеленых насаждений 2015 г.; в) Заводской район на снимке Yandex

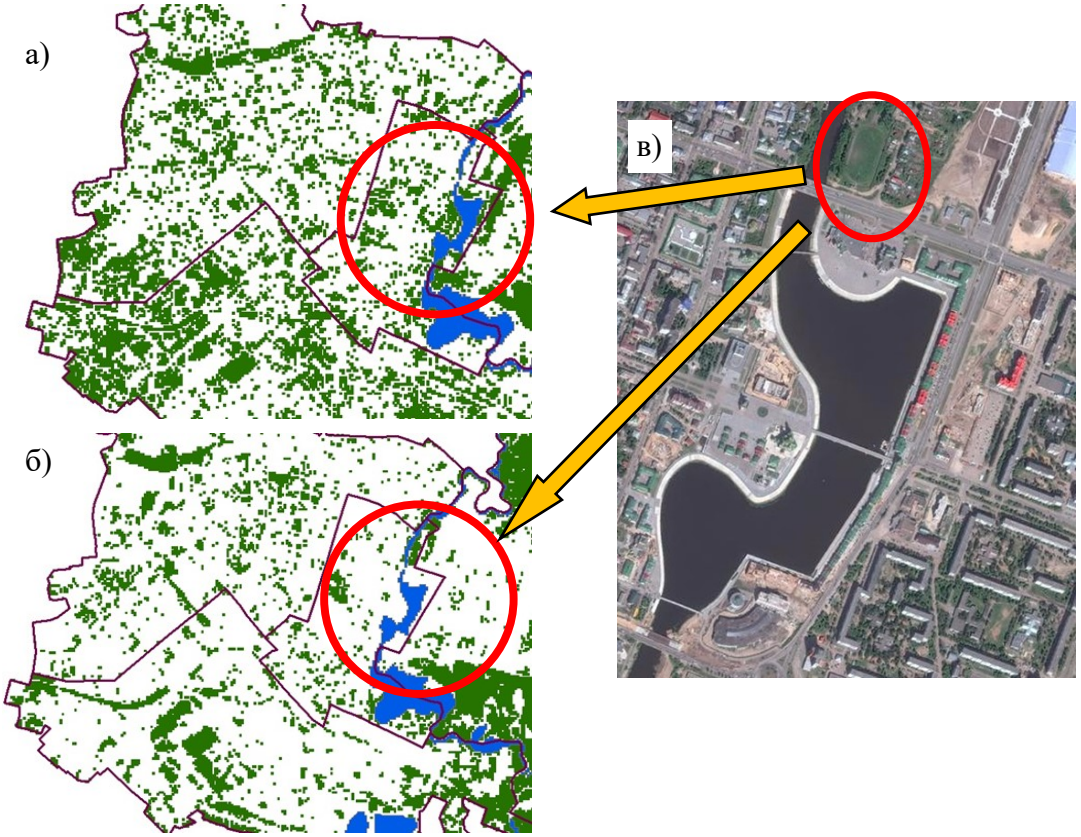


Рис.6. Мониторинг площади зеленых насаждений в Заречном районе за период с 1989 по 2015 гг.: а) карта зеленых насаждений 1989 г.; б) карта зеленых насаждений 2015 г.; в) Заречный район на снимке Yandex

На этих землях происходит формирование высокополнотных и продуктивных березовых и сосновых насаждений.

По результатам исследований были выявлены следующие тенденции в изменении зеленых насаждений на территории городского округа за 1989-2015 гг.:

1) средний размер зеленых насаждений за эти годы снизился с 0,5 до 0,4 га (рис. 7а);

2) произошло увеличение количества зеленых зон с 3494 шт до 4373 шт (рис.7б);

3) лесистость имеет явную тенденцию к снижению с 20,3 % в 1989 году до 17,3 % в 2015 году (рис. 7в);

4) показатель степени фрагментированности зеленых насаждений (рис. 7г) также имеет тенденцию к росту.

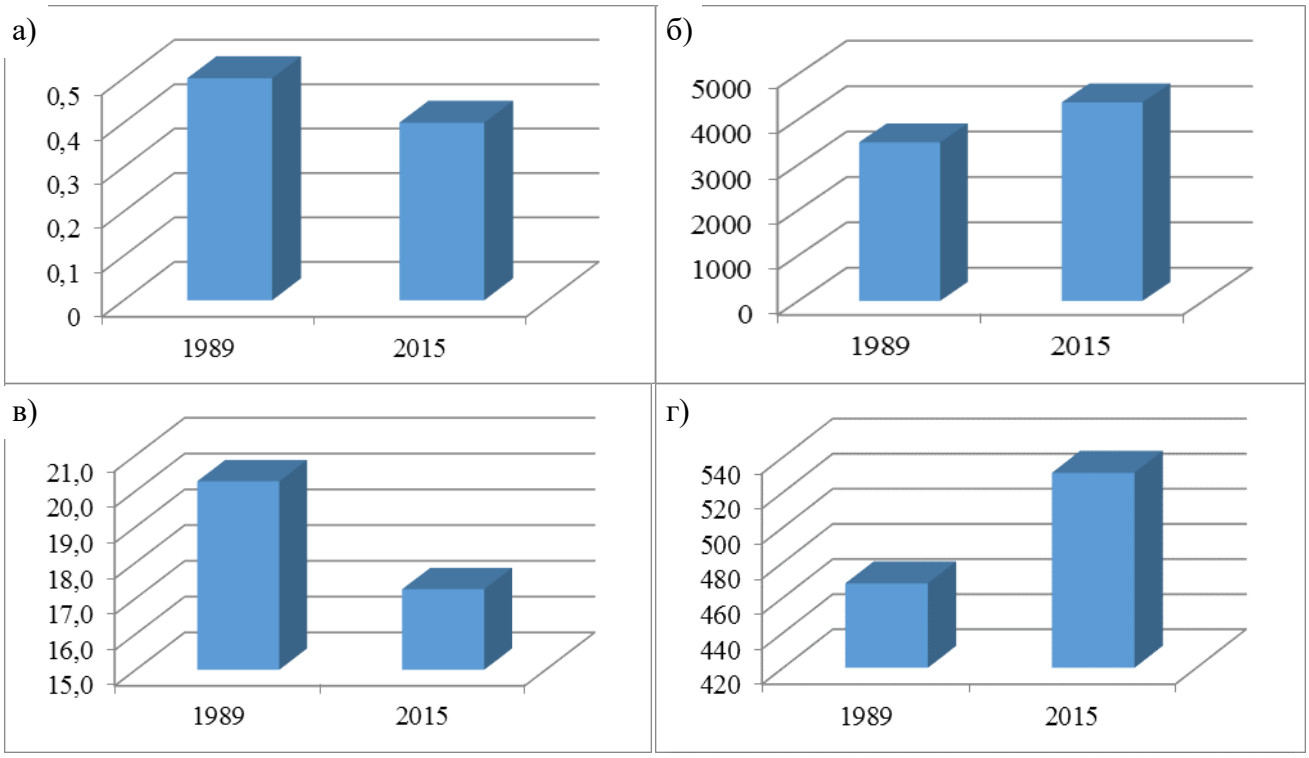


Рис. 7. Динамика ландшафтных индексов лесных участков города Йошкар-Олы за период с 1989 по 2015 гг.: а) средний размер, б) количество зеленых зон, в) лесистость, г) среднее расстояние

Полученные ландшафтные индексы для зеленых насаждений города Йошкар-Олы говорят о том, что пространственное распределение участков растительного покрова приобретает все более фрагментированный характер.

По районам г. Йошкар-Олы в целом наблюдается устойчивость лесных экосистем. Выявлено снижение индекса Шеннона лишь в заречной части города за счет неравномерного распределения видового (породного) состава зеленых насаждений.

По данным спутниковых снимков исследуемой территории площадь зеленых насаждений и застройки в черте города Йошкар-Олы 1726 га и 1426,4 га соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Площадь землепользования, га

Микрорайоны города	1989 год		2015 год	
	зеленые насаждения	застройка	зеленые насаждения	застройка
Заречный	893,7	275,8	949	361,7
Заводской	295,4	332,8	194,7	442,4
Центральный	98,2	96,6	52,1	233,9
Южный	740,6	302,4	530,3	388,4
ВСЕГО	**2027,9**	**1007,6**	**1726,0**	**1426,4**

При оценке данных тематического картирования разновременных спутниковых снимков было выявлено, что в 1989 году площадь застройки г. Йошкар-Олы составила 1007,6 га , площадь зеленых насаждений – 2027,8 га. В 2015 году распределение по площади по этим категориям земель составило 1726,0 га под зелеными насаждениями и 1426,4 га – постройками.

Интенсивность темпа роста AGR города Йошкар-Ола за 26 лет составила 4,2%. По данным Федеральной службы государственной статистики строительство жилых домов в РМЭ в 2015 году по отношению к 2014 году возросло на 5,6 %, что больше, чем в среднем по Приволжскому федеральному округу (0,3%) (О жилищном строительстве, 2015). По данным Маристата темп роста общей площади жилых помещений в г. Йошкар-Ола 2015 году по сравнению с 2014 году составил 2,3% (База данных показателей МО, 2015). В докладе мэра города Йошкар-Олы о достигнутых значениях показателей оценки эффективности деятельности органов местного самоуправления городского округа «Город Йошкар-Ола» за 2011 год - доля земельных участков в городском округе «Город Йошкар-Ола», предоставленных для строительства в 2011 году составила 3,4%.

В последние годы в г. Йошкар-Ола наращиваются темпы роста строительства в рамках архитектурно-градостроительного решения.

Полученные результаты свидетельствуют о снижении показателя экологического состояния г. Йошкар-Ола за исследуемый период. В 1989 году он составил 1,7, в 2015 году снизился до 1,4 (рис. 9), что можно объяснить расширением точечной застройки города.

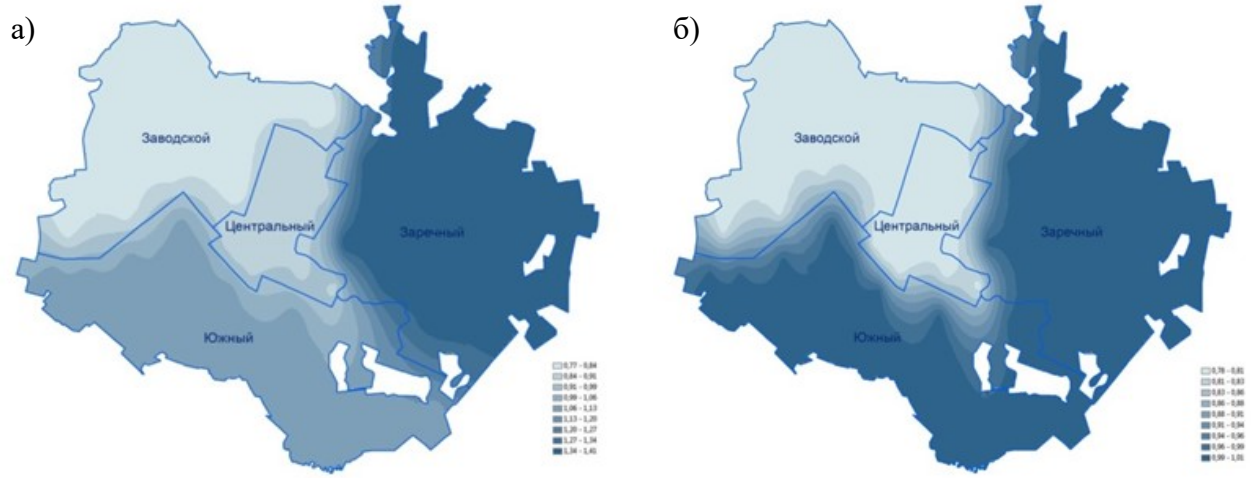


Рис. 9. Карта экологического состояния территории г. Йошкар-Ола: а) в 1989 г. б) в 2015 г.

Таким образом, на основе значений пространственных индексов и степени влияния этих показателей на экологическое состояние объекта исследования, следует, что г. Йошкар-Олы является территорией удовлетворительного состояния среды.

Выводы

В результате проведенного исследования получены следующие основные научные и практические результаты.

В работе показана возможность использования разновременной спутниковой информации для мониторинга зеленых насаждений г. Йошкар-Олы, что может повысить эффективность при принятии решений в городском планировании. При этом важным моментом предложенного метода мониторинга является комплексное использование спутниковых снимков среднего разрешения (Landsat).

В основе методики исследований лежит неуправляемая классификация разновременных спутниковых снимков (1989 и 2015 гг.), которая обеспечивает высокую степень точности тематического картирования. Для оценки изменений зеленых насаждений города выделен породный состав деревьев.

Применение пространственных индексов и данных ДЗЗ показывает хорошие результаты при оценке зеленых насаждений городских лесов. Вновь полученные тематические карты по спутниковым снимкам Landsat показывают, что за последние 26 лет пространственное распределение участков зеленых насаждений приобретает все более фрагментированный характер.

Полученные результаты индекса Шеннона свидетельствуют о том, что в 2015 году происходит повышение биоразнообразия за счет неравномерного распределения зон зеленых насаждений (породного состава деревьев с преобладанием мелколиственных пород) в черте города, а также в результате естественного их возобновления в разных микрорайонах города.

Интегральный показатель экологического состояния зеленых насаждений г. Йошкар-Олы показал снижение экологического состояния в 2015 году по отношению к 1989 году, что можно объяснить расширением точечной застройки города. В этом случае требуется разумное хозяйственное использование территорий и планирование мероприятий по их улучшению.

В целом за период 1989-2015 гг. наблюдается сокращение площади зеленых насаждений на 301,7 га и увеличение степени изолированности отдельных участков растительного покрова на 63 м, что в будущем может повысить риск их нарушений при постоянно возрастающей антропогенной нагрузке.

Работа выполнена по проекту № 2394 «Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем» в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации 2014-2016 гг.

Библиографический список

1. База данных показателей муниципальных образований. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – URL: http://maristat.mari.ru/scripts/munstInet/DBInet.cgi/. – 18.03.2015.
2. Барталев, С.А., Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 203-221.
3. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг городских лесов / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева, В.О. Коптелов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 1(25). – С.5-21.
4. Воробьев О.Н. Спутниковый мониторинг недропользования в Республике Марий Эл / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Геоматика. – Москва: Совзонд, 2015. – № 1. – С. 45-52.
5. Губаев, А.В. Классификация наземного покрова Среднего Поволжья по спутниковым снимкам среднего разрешения / А. В. Губаев, Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, С. А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международного научно-практического семинара [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – С.7-19. – URL: http://csfm.marstu.net/publications.html.
6. Дмитриев, В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы / В.В. Дмитриев // Общество. Среда. Развитие. – 2009. – №4. – С. 146-165.
7. Воробьев, О.Н. Мониторинг состояния растительного покрова на территории Республики Марий Эл с использованием ENVISAT MERIS / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2013.– № 7(99). – С. 42-45.
8. Карев, В.Б. Экологическая устойчивость региональной территории [Электронный ресурс] / В.Б. Карев, Н.Т. Кавешников // Роль обустройства сельских территорий в обеспечении устойчивого развития АПК: материалы международной научно-практической конференции. – М.: Московский государственный университет природопользования, 2007. – URL: http://www.ieek.timacad.ru/science/1/sb-07/sb-07_2_15.html.
9. 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. – № 1 (13). – С. 36-48.
10. Курбанов, Э.А. Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова: монография. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – 131 с.
11. Курбанов, Э.А. Опыт сохранения уникальных лесов и биологического разнообразия в национальных парках западного побережья США / Э.А. Курбанов, М.А. Яцков, О.Н. Воробьёв, А.В. Губаев, С.А. Лежнин // Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – 2011. – № 1. – С. 99-107.

12. Курбанов, Э.А. Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев и др. // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2010. –№ 2 (9). – С. 14-20.
13. Курбанов, Э.А. Оценка лесных гарей Чувашии методами дистанционного зондирования / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Вестник ИрГСХА. – 2013. – № 54. – С. 80-97.
14. 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.
15. Малышева, Н.В. Дистанционное зондирование для изучения лесных экосистем, учета, контроля и управления лесными ресурсами / Н.В. Малышева // Лесохозяйственная информация. – 2002. – №1. – С. 31-62.
16. Общая характеристика Республики Марий Эл. Официальный интернет-портал Республики Марий Эл. Проверено 25 февраля 2012. Архивировано из первоисточника 19 мая 2012.
17. О жилищном строительстве в 2015 году [Электронный ресурс] / Федеральная служба государственной статистики. – URL:http://www.gks.ru/bgd/free/B04_03/IssWWW.exe/Stg/d06/19.htm. –10.03.2015.
18. Публичная кадастровая карта [Электронный ресурс]. – URL: http://maps.rosreestr.ru/PortalOnline. – 08.03.2015.
19. Харин, Н.Г. Возможности использования вегетационного индекса (NDVI) для изучения фенологии и состава лесов России / Н.Г. Харин, В.М. Жирин, Р. Татеиши // Исследование земли из Космоса. – 2006. – № 3. – С. 89-96.
20. Хлюстов, В.К. Информационные технологии устойчивого управления лесами. / В.К. Хлюстов, С.Х. Лямеборшай // Palmarium Academic Publishing, 2014. – 120 с.
21. Шарая, Л.С. Прогнозное картографирование лесных экосистем (Ландшафтно-экологический подход) / Л.С. Шарая // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013.– Т. 15, № 3. – С. 38-47.
22. Heywood, I. An introduction to geographical information systems / Ian Heywood, Sarah Cornelius, Steve Carver // Pearson Education Limited, England, third edition. – 2006. – 426 p.
23. Ji, L. Spatially explicit estimation of aboveground boreal forest biomass in the Yukon River Basin, Alaska / L. Ji, B.K. Wylie // International Journal of Remote Sensing. – 2015. – Vol. 36. – No. 4. – P. 939-953.
24. Kathleen, T.W. Geospatial methods provide timely and comprehensive urban forest information /T.W. Kathleen, G.R. Johnson // Urban Forestry and Urban Greening. – 2007. – № 6. – P. 15-22.
25. Kumar, J.A.V. Spatio-temporal analysis for monitoring urban growth–a case study of Indore city / J.A.V. Kumar, S. Pathan et al. // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. – 2007. – Vol. 35(1). – P. 11-20.
26. 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.
27. Russel, J.M. Remote sensing provides a progressive record of vegetation change in northern KwaZulu-Natal, South Africa, form 1994 to 2005 / J.M. Russel, D. Ward // International Journal of Remote Sensing. – 2015. – Vol. 35. – No. 3. – P. 904-926.
28. Yuan, F. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing / F. Yuan, K.E. Sawaya, B.C. Loeffelholz, M.E. Bauer // Remote Sensing of Environment. – 2005. – № 98. –P. 317-328.
29. Xie, Y. Remote sensing imagery in vegetation mapping: A review /Y. Xie, Z. Sha, M. Yu // Journal of Plant Ecology. – 2008. – № 1 (1). – P. 9-23.

УДК 630*587.6

ОЦЕНКА ЗАРАСТАНИЯ ГАРЕЙ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ (НА ПРИМЕРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА «ПРИСУРСКИЙ»)

С.А. Меньшиков
Пензенский филиал ФГБУ «Рослесинфорг»

В статье рассмотрена методика оценки зарастания гарей на основе классификации разновременных спутниковых снимков высокого разрешения. Предложена технология создания тематических карт с использованием метода неуправляемой классификации IsoData. Проведены апробация и оценка разработанной методики на территории Государственного природного заповедник «Присурский» Чувашской Республики. Определена динамика зарастания гарей объекта исследования. Тематические карты показали высокую степень валидации с данными тестовых участков и материалами лесоустройства.

Ключевые слова: *спутниковый снимок, геоинформационная система, тематическая карта, лесные гари, лесовозобновление*

MONITORING OF REFORESTATION ON BURNT AREAS BY SATELLITE IMAGES (ON THE EXAMPLE OF THE STATE NATURAL RESERVE "PRISURSKY")

S.A. Menshikov
Penza Forest Inventory Agency

The article describes the method of estimating afforestation on the burnt areas based on the classification of multi-temporal satellite images of high resolution. The technology of creating thematic maps using the method of IsoData unsupervised classification is proposed. The approbation and estimation techniques developed in the territory of the State Nature Reserve «Prisursky» in the Chuvash Republic. The research determined the dynamics of afforestation on the burnt areas of the study object. Thematic maps showed a high degree of validation of test fields data and forest materials.

Keywords: *satellite imagery, geographic information system, thematic map, burnt area, reforestation.*

Введение

Пожары являются одним из наиболее опасных антропогенных факторов, оказывающих негативное воздействие на лес. В Российской Федерации ежегодно случается большое количество лесных пожаров разных по интенсивности и площади, что требует наличия эффективных методов оценки лесопожарной обстановки и растительного покрова. В настоящее время наиболее эффективным методом оценки растительного покрова выступает дешифрирование данных дистанционного зондирования (Барталев и др., 2010; Жирин и др., 2013; Воробьев и др., 2015). Этому способствует увеличение числа российских и зарубежных спутниковых систем, а также программных средств по обработке спутниковых изображений.

За последние три десятилетия проведено большое количество исследований в области тематического картирования нарушенных лесных территорий. Многие подобные работы посвящены картографированию масштабных лесных пожаров с использованием спутниковых данных MODIS (Loboda et al, 2007; Hope et al., 2012). Для построения карт очагов пожаров используются пиксели, характеризуемые высокой температурой как по абсолютной величине, так и по отношению к окружающей территории (Архипкин и др., 2009).

Стратификация лесов с использованием данных дистанционного зондирования среднего разрешения группы Landsat показала высокую приемлемость. Комбинирование подходов по трансформации изображений методом Tasseled Cap «колпачок с кисточкой» и тематической классификации по методу опорных векторов позволило повысить разделимость классов наземного покрова (Курбанов и др., 2013).

Греческими учеными (Mitri et al., 2011) была представлена методика мониторинга динамики лесных экосистем после пожаров. В работе использовались спутниковые снимки высокого разрешения (Quick-Bird), а также гиперспектральная съемка (EO-1 Hyperion). Качество картирования сгоревших лесных участков на спутниковых снимках показало высокий уровень точности.

Качество тематического картирования значительно повышается при использовании снимков высокого разрешения («Канопус-В», «Ресурс-П»). Использование алгоритма пошаговой классификации изображений позволило наиболее точно выделять необходимые тематические классы (Воробьев и др., 2015).

Изучение временных наборов данных дистанционного зондирования высокого разрешения возможно с использованием вегетационных индексов. Метод CCSM (Cross-correlogram spectral matching algorithm) позволяет определить изменения в наземном покрове на основе анализа временных рядов «нормализованного относительного индекса растительности» NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Wang et al., 2009).

На сегодняшний день имеется большое количество исследований по созданию тематических карт на глобальном уровне, региональная оценка изменений растительного покрова остается недостаточно изученной при решении проблем мониторинга лесовозобновления гарей (Курбанов и др., 2014).

Аномально высокие температуры 2010 года способствовали резкому увеличению числа лесных пожаров в России. На территории государственного природного заповедника «Присурский» Чувашской Республики огнем было уничтожено более 700 га лесных насаждений.

Целью исследований было оценить процесс лесовозобновления на гарях государственного природного заповедника «Присурский» Чувашской Республики по разновременным спутниковым снимкам высокого разрешения. Для решения этой цели были поставлены следующие **задачи:**

- с помощью разновременных спутниковых снимков высокого разрешения создать тематические карты наземного покрова Присурского заповедника;
- заложить пробные площади на исследуемой территории для последующей оценки точности тематических карт гарей;
- провести анализ и оценку точности созданных тематических карт с помощью матрицы различий (Confusion Matrix) и коэффициента Каппа (Kappa Index).

Методика

Для работы использовались композитный мультиспектральный снимок, созданный из панхроматического изображения высокого пространственного разрешения «Канопус-В» (2015 г.) и мультиспектральных данных среднего разрешения Landsat 8 (2015 г.), а также мультиспектральный спутниковый снимок Pleiades (2012 г.) (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика спутниковых данных

Спутник	Пространственное разрешение, м	Спектральный диапазон, мкм	Режим съемки
Pleiades	2.0	0.43-0.55 (синий) 0.49-0.61 (зеленый) 0.60-0.72 (красный) 0.79-0.95 (ближний ИК)	Мультиспектральный
Канопус-В	2.5	0.54-0.86	Панхроматический
Landsat 8	30.0	0.45-0515 (синий) 0.525-0.6 (зеленый) 0.63-0.68 (красный) 0.845-0.885 (ближний ИК)	Мультиспектральный

Космические снимки были предоставлены для научных исследований архивом Пензенского филиала ФГБУ «Рослесинфорг» (рис. 1). Предварительная подготовка изображений была проведена в программном пакете ScanEx IMAGE Processor 4.2. Для спутниковых снимков проведены процедуры ортотрансформирования, геометрической и атмосферной коррекции. Все изображения были приведены к единой системе координат (проекция карты WGS 1984, UTM, зона 38N). Для создания композитного изображения были использованы снимки, имеющие максимально близкие даты съемки.

Для получения тематической карты наземного покрова по спутниковому снимку Pleiades использовался следующий алгоритм действий. На первом этапе для выделения базового класса «Не лесные и не покрытые лесом земли» была использована неуправляемая классификация IsoData (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique – итеративный самоорганизующийся способ анализа данных) (рис. 2) (Курбанов и др., 2013). В результате классификации для исследуемой территории были получены 8 классов наземного покрова, представленные

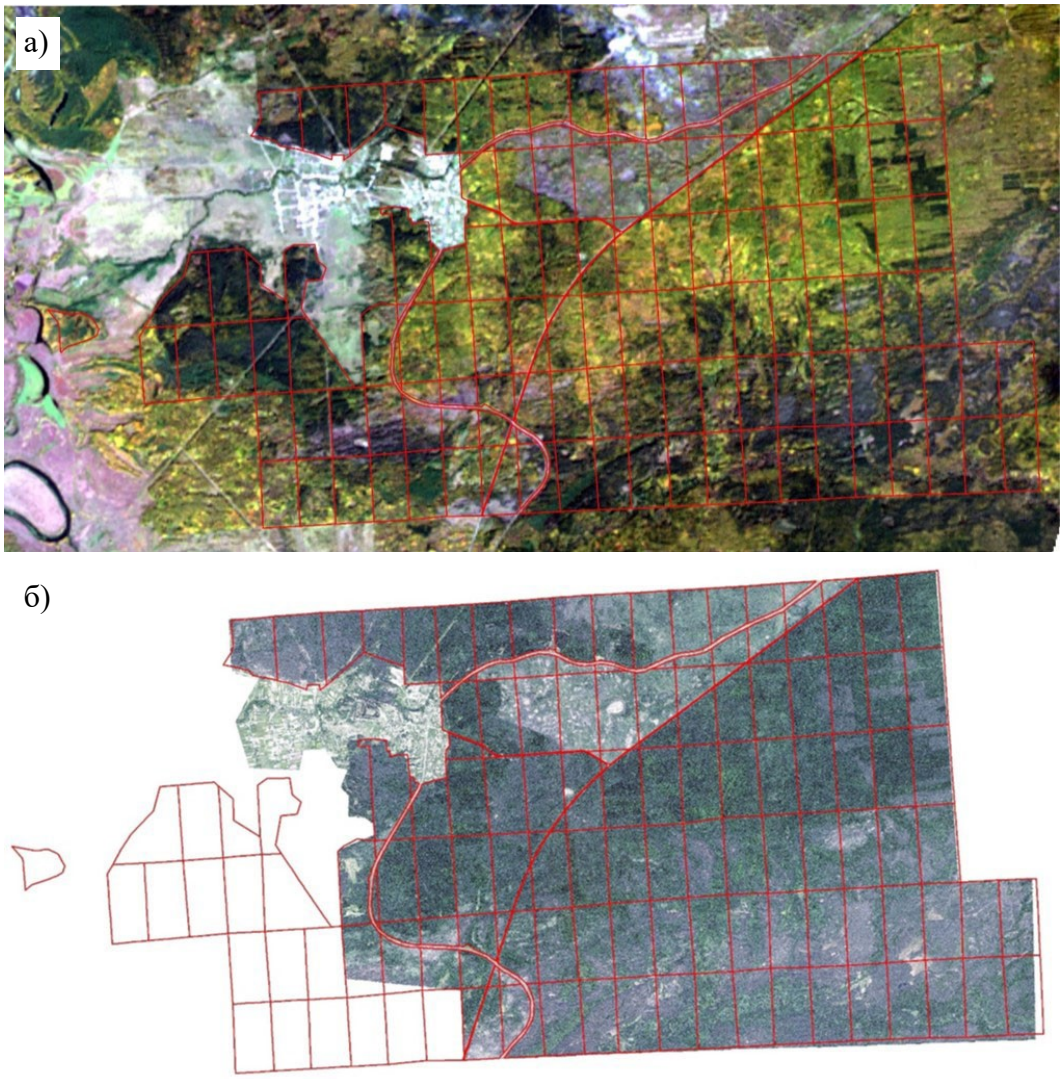


Рис. 1. Квартальная сеть ГПЗ «Присурский» на спутниковых снимках: а) синтезированное изображение «Канопус-В» (2015), б) Pleiades (2012)

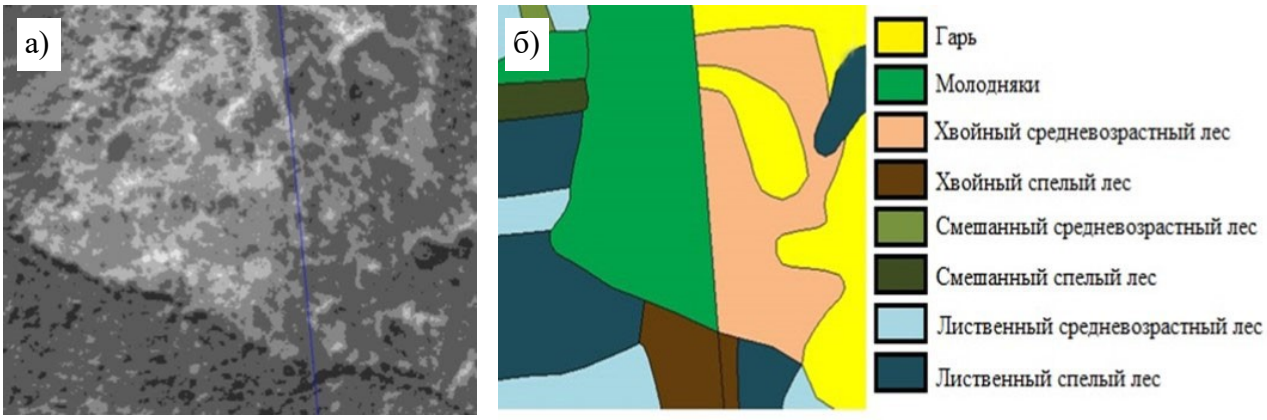


Рис. 2. Фрагменты тематической карты после классификации изображения Pleiades 2012 г.: а) первичная классификация изображения методом IsoData на снимке; б) генерализированная тематическая карта с 8 классами лесного покрова

на рисунке 2, среди которых хорошо выделяется класс гари 2010 г. Полученные классы и тематическая карта были использованы при окончательном отборе полигональных объектов класса «гарь» на основе экспертного объектно-ориентированного дешифрирования.

В программном пакете ScanEx IMAGE Processor 4.2 была проведена векторизация выделенных слоев оцениваемого изображения спутника Pleiades 2012 г. Далее в программном па-

кете ArcGIS 10.2.2 была выполнена интеграция данных слоев в один целый тематический слой «гарь» на всю территорию исследования.

Создание композитного изображения было проведено в программном пакете ScanEx IMAGE Processor 4.2 с использованием операции улучшения пространственного разрешения (Image Fusion). Для проведения этой операции был выбран метод «резкое слияние». Предварительно спутниковые снимки Канопус-В и Landsat 8 прошли процедуру пространственного совмещения (рис. 3). Классификация композитного изображения была проведена таким же образом, как и для снимка Pleiades.

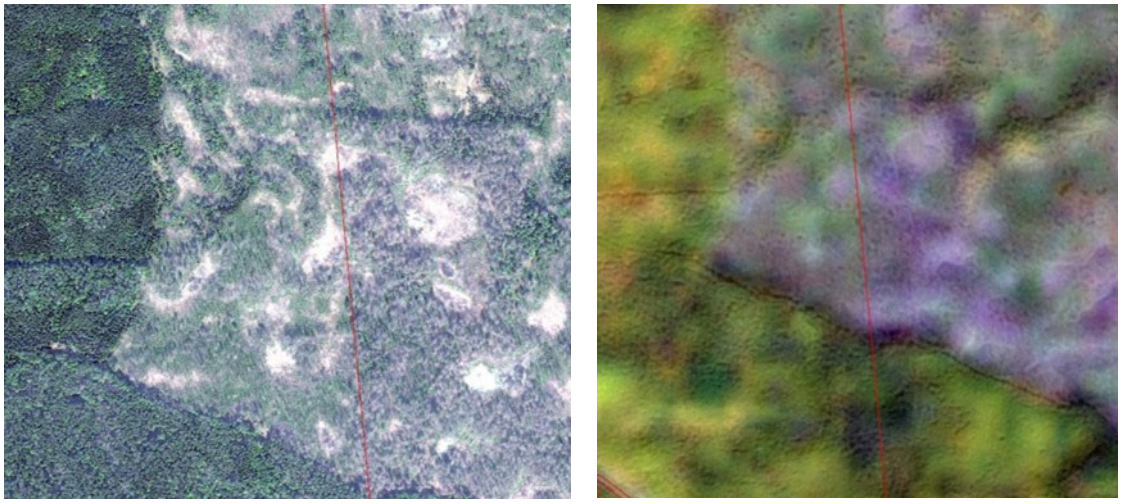


Рис. 3. Динамика зарастания гарей ГПЗ «Присурский» Чувашской Республики по спутниковым данным: а) изображение участка гари 2010 г. на снимке Pleiades 2012 г.; б) частичное зарастание участка гари на снимке «Канопус-В» 2015 г.

В полевой сезон 2015 г. на исследуемой территории гарей 2010 г. были заложены 15 тестовых участков (ТУ). Каждый ТУ закреплялся на местности с использованием GPS-приемника. В дальнейшем расположение каждого участка было определено на тематической карте гарей. Основными показателями оценки гарей на ТУ стали: количество деревьев и состояние древостоя, наличие подроста, его породный состав и распределение по разрядам высот, запас валежной древесины (Курбанов, Воробьев, 2008). Валидация проведенной работы состояла в идентификации ТУ в качестве эталонных значений на космических снимках и тематической карте.

Проверка точности тематической карты проводилась с использованием матрицы различий (Confusion Matrix) и коэффициента Каппа (Kappa Index) (Wang, 2009; Курбанов и др., 2015).

Результаты исследований

Полученная тематическая карта гарей по изображению Pleiades представляет собой два крупных лесных массива общей площадь 594,6 га, разделенных железной дорогой. Гари характеризуются неоднородностью наземного покрова, что объясняется неравномерным вывалом отмершего древостоя. Данный момент был выявлен при определении показателей на ТУ. При генерализации слоя гарей исключены из векторизации объекты площадью меньше100 $м^2$, т.е. объекты площадью меньше 25 пикселей.

На тематической карте по композитному снимку Канопус-В общая площадь гарей составляет 106,3 га. Контур гарей в целом соответствует контуру, полученному по изображению Pleiades.

При анализе тематических карт и полевых данных выявились следующие изменения. При сравнении площадей полученного класса «гарь» отмечается его уменьшение на 488,3 га, а также увеличение площади класса «молодняки» на 586,7 га. Выявлено уменьшение площадей классов спелых хвойных и лиственных лесов в пределах контуров гарей. Площадь хвой-

ных спелых насаждений сократилась на 70,3 га, лиственных спелых уменьшилась на 28,1 га. Такие изменения могут быть связаны с усыханием поврежденных огнем древостоев.

В 2013 г. на территории заповедника было проведено лесоустройство. На основании материалов этого лесоустройства и полученных тематических карт спутниковых изображений Pleiades (2012 г.) и «Канопус-В» (2015 г.) была определена динамика зарастания гарей (рис. 4).

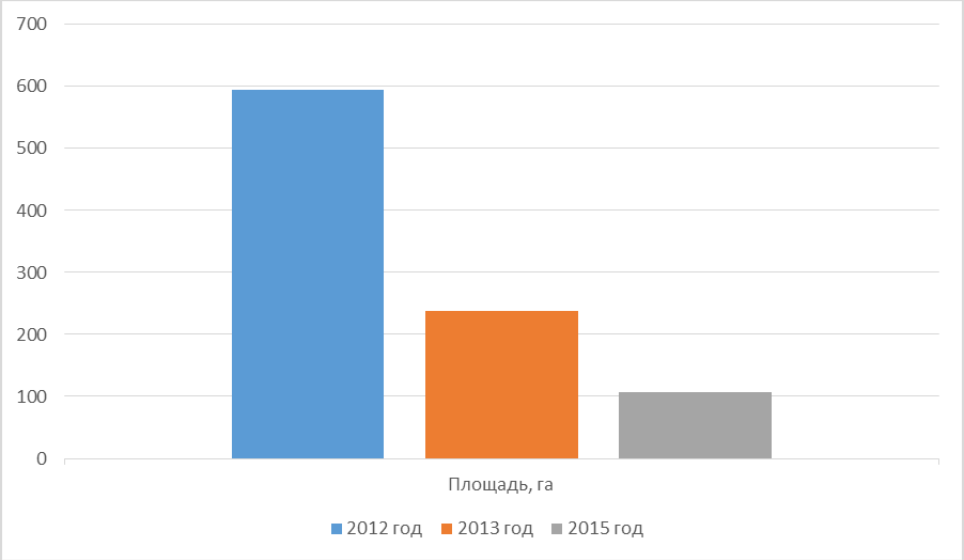


Рис. 4. Динамика зарастания гарей по данным тематических карт и материалов лесоустройства

Уменьшение площади класса «гарь» за 4 года в 5,6 раза, в связи с переходом их в класс «молодняки», свидетельствует о том, что процесс естественного лесовозобновления протекает успешно.

Выводы

Использование спутниковых снимков высокого разрешения позволило точно выделить участки гарей объекта исследований. Применение способа улучшения пространственного разрешения мультиспектральных данных с помощью панхроматического канала позволило получить синтезированное изображение высокого разрешения. На основе анализа тематических карт, полученных с разновременных космических изображений удалось оценить темпы возобновления древесной растительности в условиях хвойно-широколиственной зоны европейской части РФ. Описанные процессы лесовосстановления наиболее интенсивно протекали в 2012-2013 гг. Следовательно, основное зарастание гари в условиях ГПЗ «Присурский» происходит в течение первых трех лет с момента лесного пожара. Достоверность исследования обеспечивают данные полевых изысканий и материалы лесоустройства. Разработанная методика оценки зарастания гарей на основе классификации разновременных спутниковых снимков высокого разрешения будет полезна лесоустройству, при мониторинге лесного фонда и научной деятельности. Данная работа позволит прогнозировать процессы лесовозобновления на территории Чувашской Республики. Результаты исследования использованы в производственной деятельности Пензенского филиала ФГБУ «Рослесинфорг».

Библиографический список

1. Архипкин, О.П. Картирование крупных пожаров на основе временных рядов данных космического мониторинга / О.П. Архипкин, Л.Ф. Спивак, Г.Н. Сагатдинова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: сб. науч. ст. – М.: ООО «До-Мира», 2010. – Т. 7. – № 2. – С. 90-96.

2. Барталев, С.А. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений / С.А. Барталев, В.А. Егоров, А.М. Крылов, Ф.В. Стыценко, Т.С.

Ховратович // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – № 3. – С. 215-225.

3. Воробьев, О.Н. Методика пошаговой классификации спутниковых снимков для тематического картирования лесов / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, Е.Н. Демишева // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 4 (28). – С. 57-72.

4. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг лесных гарей в Марийском Заволжье / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – 2012. – № 1. – С. 12-22.

5. Воробьев, О.Н. Спутниковый мониторинг недропользования в Республике Марий Эл / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Геоматика. – 2015. – №1(26). – С. 45-52.

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

7. Курбанов, Э.А. Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Незамаев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2013. – № 3. – С. 72-82.

8. 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.

9. Курбанов, Э.А. Пространственное распределение крупного древесного детрита в сосняках Марийского Заволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев // Экология. – 2008. – №2. – С. 103-109.

10. 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.

11. Loboda, T. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data / T. Loboda, K.J. O'Neal, I. Csiszar // Remote Sensing of the Environment. – 2007. – Vol. 109(4). – P. 429-442.

12. Hope, A. Characterizing post-fire recovery of fynbos vegetation in the Western Cape Region of South Africa using MODIS data / A. Hope, N. Albers, R. Bart // International Journal of Remote Sensing. – 2012. – № 33(4). – P. 979-999

13. Mitri, G. Mapping post-fire forest regeneration and vegetation recovery using a combination of very high spatial resolution and hyperspectral satellite imagery / George H. Mitri, Ioannis Z. Gitas // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2011. – Vol. 48, Issue 3. – P. 1613-1618.

14. Wang, Le. Land cover change detection with a cross-correlogram spectral matching algorithm / Le Wang, Jin Chen, Peng Gong et al. // International Journal of Remote Sensing. – 2009. – Vol. 30, № 12. – P. 3259-3273.

УДК 502.45

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ КОМПЛЕКСА МУСОРОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА И ПРИЛЕГАЮЩЕГО К НЕМУ ПОЛИГОНА ТБО

А.С. Шевченко
Поволжский государственный технологический университет

ГИС-технологии являются одним из важнейших аспектов подборки метода, направленного на решение вопроса выбора участка для строительства мусороперерабатывающего завода (МПЗ), а также размещения полигона твердых бытовых отходов (ТБО) на прилегающей территории. В статье приведен обзор научных публикаций в области технологий по проведению исследований для выбора таких участков. Для исследования был выбран Волжский район Республики Марий Эл. В работе использованы спутниковый снимок Landsat-8 и цифровая модель рельефа на исследуемую территорию. В результате исследования было выявлено, что наиболее пригодными территориями для строительства комплекса являются центральная и северо-восточная части Волжского района.

Ключевые слова: *ГИС-технологии, полигоны твердых бытовых отходов, мусороперерабатывающий завод, многокритериальный анализ, алгебра карт.*

APPLICATION OF GIS TECHNOLOGY IN DETERMINING OF LOCATION FOR COMPLEX WASTE RECYCLING PLANT AND THE ADJACENT LANDFILL

A.S. Shevchenko
Volga State University of Technology

GIS technologies are one of the most important aspects of a selection method, aimed at addressing the issue of choice land for the construction of a waste processing plant (MPZ), as well as the placement of solid waste (MSW) at a location nearby. The article provides an overview of research publications in the field of technologies needed for the in site selection studies. For the study Volzsk district of Mari El has been selected. In the study we used Landsat-8 satellite image and digital elevation model on the investigated territory. The results show that the most applicable territories for the construction of a waste processing complex are central and north-western part of Volzsk district.

Keywords: *GIS technology, municipal solid waste landfill, waste recycling plant, multi criteria evaluation, map algebra.*

Введение

Управление твердыми бытовыми и промышленными отходами является одним из наиболее важных вопросов современных урбанизированных территорий. С каждым годом количество, разнообразие и сложность отходов увеличиваются, соответственно усложняется процесс их сбора, сортировки и переработки.

На данный момент в Российской Федерации (РФ) наиболее распространенный способ удаления отходов – использование полигонов ТБО (твердые бытовые отходы).

На одного жителя РФ приходится около 15 т ТБО в год, большая часть из которых поступает на санкционированные полигоны (Шеина, Бабенко, 2013). Накопленный объем ТБО в стране составляет более 8 млрд $м^3$ бытовых и промышленных отходов, заполняемость полигонов в среднем по стране оставляет 50-90% (Андриевская, 2014).

В период 2020-2025 гг. в России планируется принять Резолюцию о запрете складирование ТБО – за исключением небольших свалок рядом с мусороперерабатывающими заводами, которые предназначены для неперерабатываемых отходов (например, пищевых) (Резолюция комиссии…, 2014).

В Республике Марий Эл (РМЭ) проблема захоронения отходов стоит особенно остро, так как многие полигоны переполнены и находятся на этапе подготовки к рекультивации или же срок их лицензий рассчитан на 10-15 лет. На территории Марий Эл действуют 1 отстойник-накопитель и 17 санкционированных полигонов ТБО, которые включены в государственный реестр объектов размещения отходов (ГРОРО). Согласно региональной схеме обращения с отходами РМЭ на 2016-2020 гг. запланировано строительство 2 мусороперегрузочных (пос. Морки, пос. Килемары) и 4 мусоросортировочные станции (г.г. Йошкар-Ола, Волжск, Козьмодемьянск, пос. Сернур) (Доклад об эколог. ситуации…, 2014). Задача подбора участков под строительство МПЗ и прилегающего к нему полигона ТБО на исследуемой территории может быть решена с использованием ГИС и данных дистанционного зондирования. Эти современные технологии позволяют проводить оперативный мониторинг за природными объектами местности (Курбанов и др., 2014).

При выборе окончательного участка размещения будущего полигона необходимо проанализировать требования и территориальные особенности альтернативных участков применительно к условиям района и фактической территории (Alanbari et al., 2014; Воробьев, Курбанов, 2015).

Цель работы – создание карты потенциальных участков для строительства МПЗ и прилегающего к нему полигона ТБО с заданными характеристиками с использованием геопро-

странственных данных, полученных на основе спутниковых изображений. Для этого была решена задача разработки методики оценки «Пригодности участков для обустройства МПЗ и прилегающего к нему полигона ТБО на территории Волжского района» на основе многокритериального анализа в программной среде ГИС данных, полученных из различных источников (публикации, спутниковые снимки, карты, цифровые модели рельефа и т.п.).

Объект и методика исследования

Объектом исследования является территория Волжского района РМЭ. Методика работ основывается на комплексном использовании ГИС-технологий, анализе спутниковых снимков, а также полевых исследованиях. Для анализа исходных данных и проведения визуального дешифрирования в исследовании используются спутниковый снимок среднего разрешения Landsat-8 (рис. 1) и цифровая модель рельефа (ЦМР) (рис. 2) с применением программного пакета ArcGIS 10.3 (Курбанов и др., 2012; Курбанов и др., 2015).

Рис. 1. Фрагмент снимка среднего разрешения Landsat – 8 на территорию Волжского района (май 2016 года)

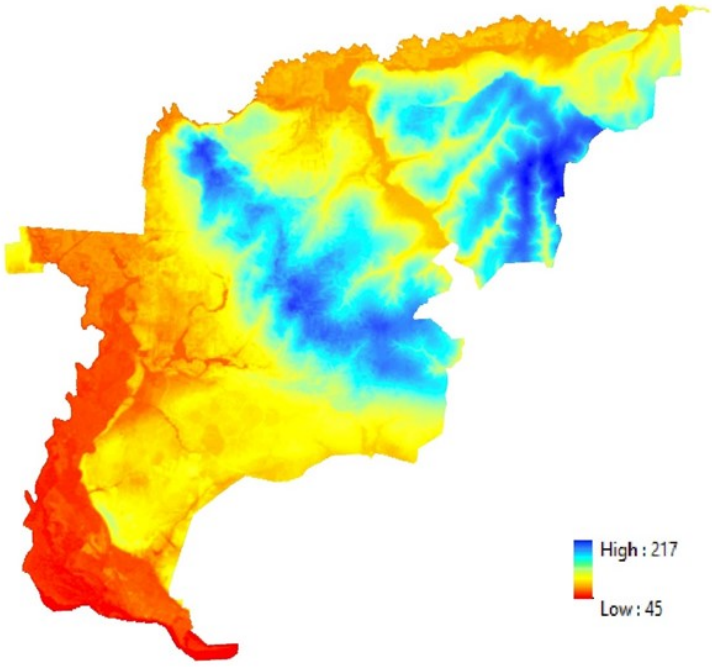


Рис. 2. Фрагмент ЦМР на территорию Волжского района (градация высот, м)

Методика разработки «Карты пригодности участков для обустройства МПЗ и прилегающего к нему полигона ТБО на территории Волжского района» основывается на комплексном использовании инструментов ArcMap 10.3: Map Algebra (Алгебра карт) и Raster Calculator (Калькулятор растров). Эти важные инструменты для вычислений, поддерживающие многочисленные операторы и функции, запросы выборки, а также синтаксис алгебры карт (Доп. модули, 2001).

Создание входных данных Алгебры карт

Операции *Алгебры карт* (точечные или локальные) осуществляют анализ и вычисление отдельно в каждой ячейке растровой сетки. Эти операции создают растровый слой из одного или нескольких входных слоев, причем значение ячейки нового слоя зависит только от значений ячеек входных слоев, имеющих те же растровые координаты (Савельев и др., 2007).

В данной работе Алгебра карт включает в себя ниже перечисленные этапы.

Для строительства полигона ТБО известен размер санитарно-защитной зоны (СЗЗ) – 500 м (СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03, 2008), тогда как для мусороперерабатывающего завода данный показатель будет зависеть от мощности его работы:

- класс I – санитарно-защитная зона 1000 м: мусоросжигательные и мусороперерабатывающие заводы мощностью свыше 40 тыс. т/год;
- класс II – санитарно-защитная зона 500 м: мусоросжигательные и мусороперерабатывающие заводы мощностью до 40 тыс. т/год;
- класс III – санитарно-защитная зона 300 м: мусороперегрузочные станции (СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03, 2008).

Водные объекты. Согласно Водному кодексу РФ, ширина водоохранной зоны (ВОЗ) рек или ручьев в зависимости от их протяженности составляет 50-200 м (Водный кодекс РФ, 2006). Учитывая наихудшее развитие событий ширина ВОЗ составила **200 м**.

Населенные пункты и объекты землепользования. Нужно учитывать тот факт, что строительство объектов не следует производить вблизи городских и сельских районов (включая территории, где производится выращивание сельскохозяйственных культур) из-за негативного влияния на здоровье людей, запаха и шума. Таким образов по действующим нормам расстояние до жилой застройки и сельскохозяйственных угодий должно быть не менее 500-1000 м. (СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03, 2008). С учетом СЗЗ полигона ТБО и максимальной мощности МПЗ буферная зона от населенных пунктов составила **1 км**.

Особо охраняемые природные территории (ООПТ). На территории Волжского района находится государственный природный национальный парк «Марий Чодра», минимальная ширина охранной зоны которого – **1 км** (Пост. Правительства РФ …, 2015).

Линии железнодорожного транспорта. Для данного объекта санитарные разрывы устанавливаются по максимальному значению – **200 м**. (СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 , 2008; ОСН 3.02.01-97, 1997).

В качестве основы подбирались и редактировались shp-файлы водных объектов, железных дорог, населенных пунктов, территорий землепользования, ООПТ (Данные OSM …, 2016). На основании анализа нормативных документов для каждого оцениваемого параметра создавалась буферная зона с помощью инструмента Buffer.

Все полученные растровые слои были переклассифицированы по одной шкале с диапазоном значений 1-10 (Доп. модули, 2001). Такая общая шкала – это пригодность каждого места (каждой ячейки) для строительства МПЗ и прилегающего к нему полигона ТБО. Более высокие значения присваивались атрибутам каждого набора, соответствующим большей пригодности (рис. 3).

Калькулятор растров

При анализе степени влияния местоположения МПЗ и прилегающего к нему полигона ТБО в модели в зависимости от важности зон, каждому фактору необходимо присвоить

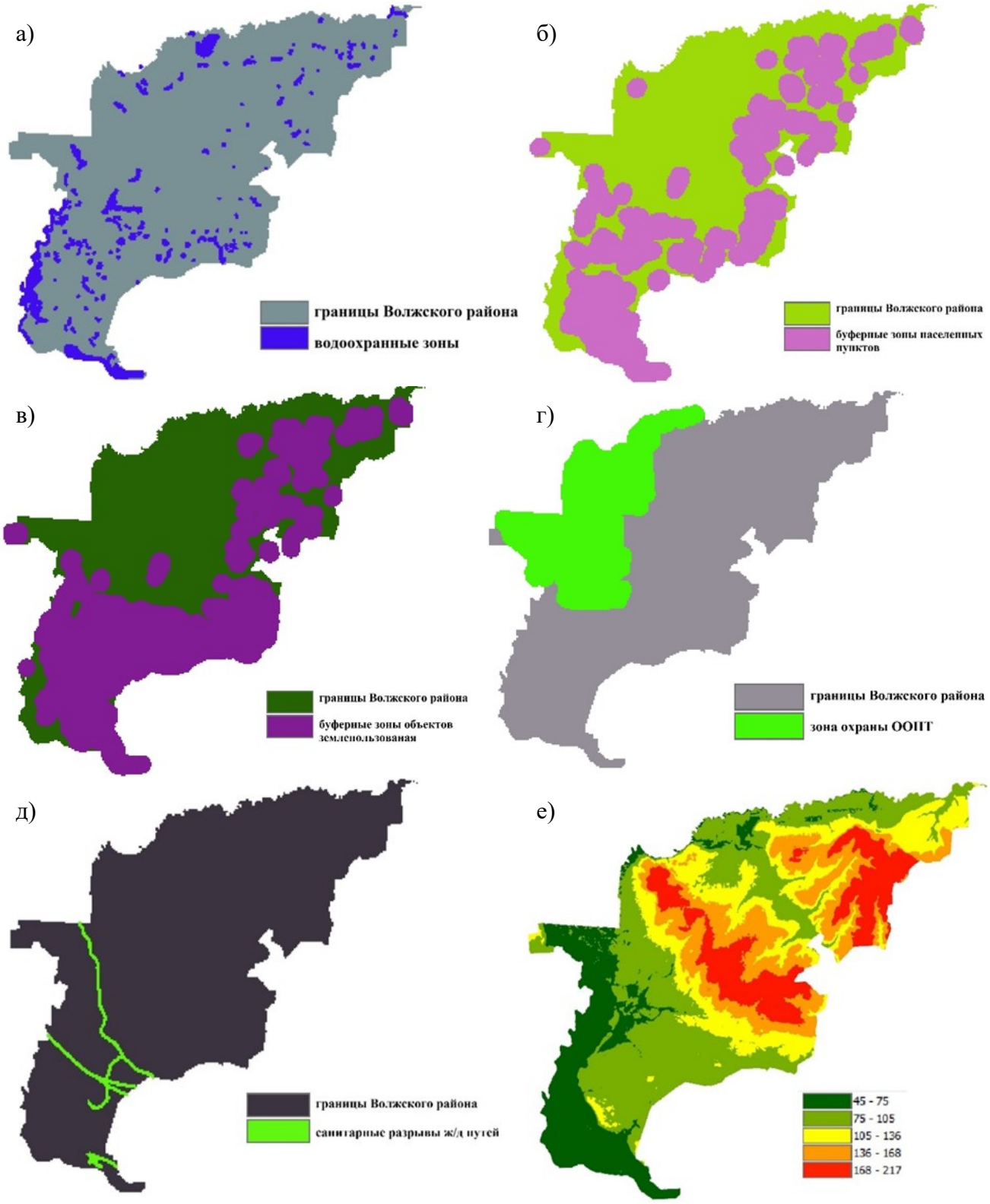


Рис. 3. Тематические слои после проведения переклассификации данных для многокритериального анализа: а) водные объекты; б) населенные пункты; в) объекты землепользования; г) территория ООПТ; д) линии железнодорожного транспорта; е) ЦМР (градация высот, м)

«веса-проценты». Чем выше вес, тем большее влияние окажет этот фактор (набор данных) на пригодность соответствующей модели (McCoy, Johnston, 2001).

Степень влияния каждого тематического слоя была оценена по шкале от 1 до 10:

- водные объекты: **3** (30%);
- населенные пункты: **4** (40%);

- линии железнодорожного транспорта: **1** (10%);
- объекты землепользования: **1** (10%);
- ЦМР: **1** (10%).

Результаты исследования

Полученная карта пригодности позволила получить итоговую тематическую карту (рис. 4) для выявления наиболее приемлемых участков с градацией классов:

- пригодные;
- умеренно пригодные;
- непригодные;
- города.

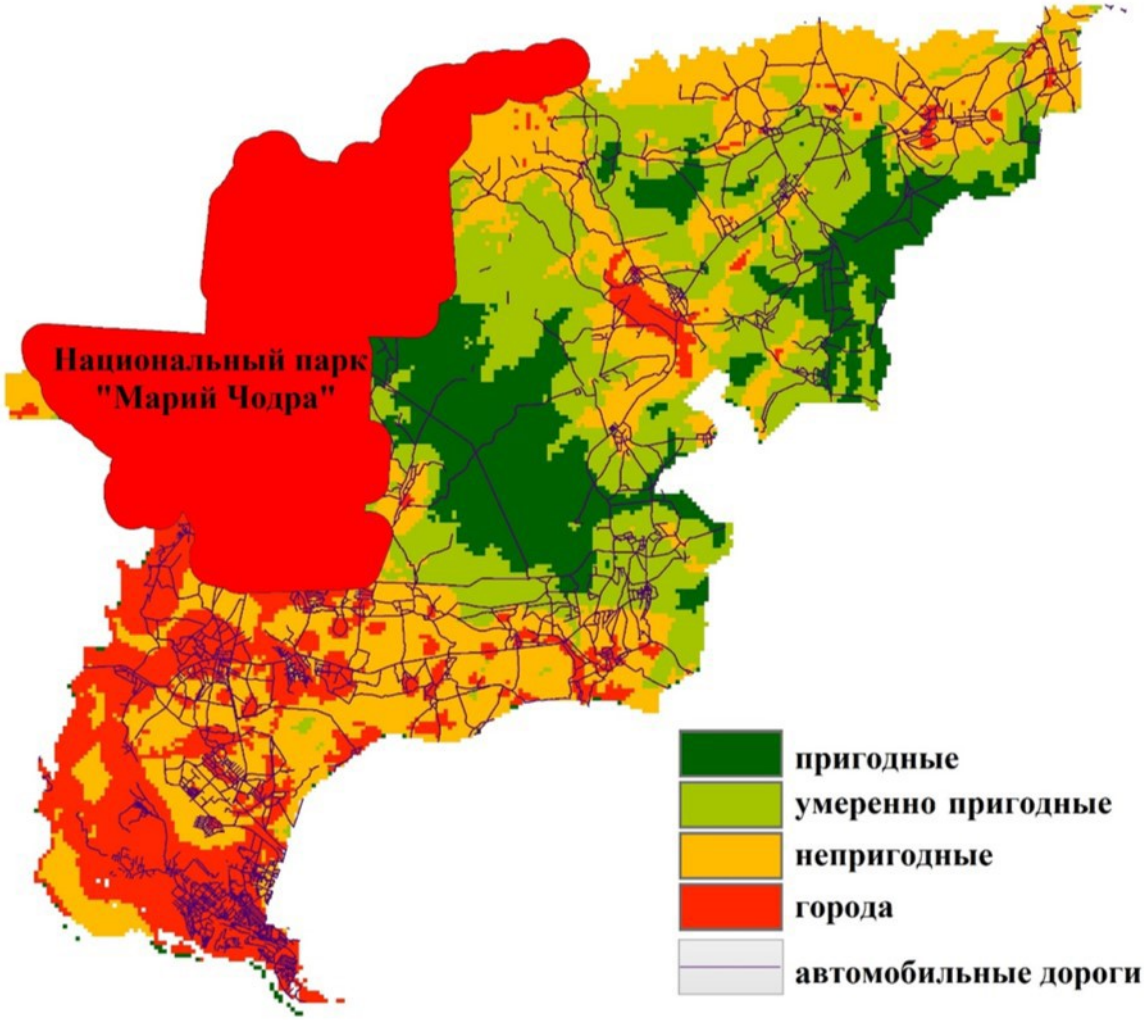


Рис. 4. Карта пригодности участков для обустройства МПЗ и прилегающего к нему полигона ТБО на территории Волжского района

По итогам тематического картирования в среде ГИС было выявлено, что наиболее пригодными территориями для строительства комплекса будут являться центральная и северо-восточная части Волжского района.

По результатам исследования была получена карта пригодности, которая может быть использована при поиске наиболее благоприятных участков для строительства МПЗ и прилегающего к нему полигона ТБО. Предложенная методика позволит упростить и удешевить разведочные работы, но для окончательного принятия решений об их строительстве необходимо также проведение инженерно-экологических изысканий.

Работа выполнена по проекту № 2394 «Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем» в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации 2014-2016 гг.

Библиографический список

1. Андриевская, А. В России могут запретить мусоросжигательные заводы [Электронный ресурс] / А. Андриевская. – 2014. – Режим доступа: URL: http://recyclemag.ru/news/v-rossii-mogut-zapretit-musoroszhigatelnye-zavody (дата обращения: 03.10.2016).

2. Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 28 декабря 2015 г. – №74. – Ст. 65.

3. Воробьев, О.Н. Спутниковый мониторинг недропользования в Республике Марий Эл / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Геоматика. – Москва: «Совзонд», 2015. – № 1. – С. 45-52.

4. Данные OSM в форматах shape-файлов. Марий Эл [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http:// beryllium.gis-lab.info/project/osmshp/ (дата обращения: 19.09.2016).

5. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2014 год / Йошкар-Ола: ИП Пермяков С.А., 2015. – 189 с.

6. Дополнительные модули к настольным продуктам ArcGIS [Электронный ресурс].– Режим доступа: URL: https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=2582&SECTION_ID=64 (дата обращения: 17.12.2016).

7. Курбанов, Э.А. Решение вопросов космического мониторинга лесных гарей в комплексных пакетах ENVI и ArcGIS / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьёв, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Геоматика. – 2012. – № 4. – С. 82-92.

8. 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.

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. Об утверждении Правил создания охранных зон отдельных категорий особо охраняемых природных территорий, установления их границ, определения режима охраны и использования земельных участков и водных объектов в границах таких зон: постановление Правительства РФ от 19 февраля 2015 г. N 138 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://base.garant.ru/70873384/ (дата обращения 08.11.2016).

11. ОСН 3.02.01-97. Отраслевые строительные нормы. Нормы и правила проектирования отвода земель для железных дорог. М. – 1997. – 51 с.

12. Резолюция комиссии Общественной палаты Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Москва, 2014. – Режим доступа: URL: http://krayniy-sever.ru/?p=1500 (дата обращения: 03.10.2016).

13. Савельев, А.А. Пространственный анализ в растровых геоинформационных системах: учебно-методическое пособие / А.А. Савельев, С.С. Мухарамова, А.Г. Пилюгин. – Казань: КГУ, 2007. – 28 с.

14. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 2.2.1/2.1.1. Проектирование, строительство, реконструкция, и эксплуатация предприятий, планировка и застройка населенных мест. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. – Введ. 10-04-2003: М., 2008.

15. Территориальная схема обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Республики Марий Эл от 13 сентября 2016 г. №170 / Утверждена приказом Департамента экологической безопасности, природопользования и защиты населения Республики Марий Эл. – 508 с.

16. Шеина, С.Г. Выбор участка размещения полигона твердых бытовых отходов и факторы, учитываемые при принятии решений / С.Г. Шеина, Л.Л. Бабенко // НАУКОВЕДЕНИЕ: интернет-журнал. – 2013. – №5. – С. 1-5.

17. Alanbari, M.A. Modeling Landfill Suitability Based on GIS and Mulricriteria Decision Analysis: Case Study in Al-Mahaweelqadaa / M. A. Alanbari, N.A. Ansari, H.K. Jasim, S. Knutsson // Natural Science. – 2014. – № 6 – P. 828-851.

18. Dragoljub, J.S. Landfill site selection using GIS technology and the analytic hierarchy process / J. S. Dragoljub, L.J. Gordana // VOJNOTEHNIČKI GLASNIK / MILITARY TECHNICAL COURIER. – 2016. – № 3. – P. 769-783.

19. McCoy, J. Using ArcGIS Spatial Analyst [Электронный ресурс] / J. McCoy, K. Johnston. – 2001. – Режим доступа: URL: http://web.pdx.edu/~emch/gis1/Using_ArcGIS_Spatial_Analyst.pdf (дата обращения: 20.11.2016).

УДК 630*528.88

МЕТОДИКА ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ФЕНОЛОГИЮ ЛЕСОВ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ

Е.Н. Демишева, О.Н. Воробьев
Поволжский государственный технологический университет

Комплексное применение данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) и геоинформационных технологий представляет уникальную возможность для анализа и оценки динамики

пространственно-временных свойств растительного покрова Земли в связи с климатическими изменениями и усилением антропогенной нагрузки на окружающую среду. Для выявления этой связи в работе использована техника регрессионного анализа на базе метода наименьших квадратов (Ordinary Least Squared, OLS) в среде ГИС. В работе оценивались показатели взаимодействия многолетних значений спектрального вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и сезонных климатических параметров: температуры подстилающей поверхности Земли (LST), максимальных температур за вегетационный период (Tmax), количество осадков (Pr) и пространственное распределение состава лесного покрова (Fc). Разработанная методика оценки влияния климатических факторов и структуры наземного покрова на фенологические показатели лесных насаждений позволяет визуализировать и статистически оценивать эти взаимосвязи. Пространственные взаимосвязи между вышеперечисленными параметрами представлены в виде регрессионных коэффициентов уравнений и коэффициентов детерминации, отражающими их уровень и степень связи за каждый год изучаемого временного периода. В результате регрессионного анализа была выявлена умеренно-устойчивая линейная связь исследуемых параметров на территории исследования за весь изучаемый временной интервал. Общий анализ трендов климатических параметров за исследуемый период не выявил рост среднегодовых температур или осадков в связи с глобальными климатическими изменениями, но позволил оценить аномальные изменения в засушливый период 2010 г.

Ключевые слова: *мониторинг лесов, фенология растений, вегетационный период, изменение климата, MODIS, GIS, NDVI, OLS.*

METHOD OF REMOTE ASSESSMENT OF IMPACT OF CLIMATIC CHAMGE ON FOREST PHENOLOGY IN REPUBLIC MARI EL

E.N. Demisheva, O.N. Vorobiev
Volga State University of Technology

Combined application of remote sensing data (RSD) and GIS technologies presents a unique opportunity to analyze and evaluate the dynamics of spatial and temporal characteristics of the Earth's vegetation cover due to climate change and increase of anthropogenic load on the environment. In order to identify this connection, the technique of regression analysis based on the method of least squared (Ordinary Least Squared, OLS) in a GIS environment was used. The indicators of interaction of multi-year values of spectral and vegetation index NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and of seasonal climatic parameters: Land Surface Temperature (LST), the maximum temperature during the growing period (Tmax), rainfall (Pr) and the spatial distribution of the composition of the forest cover (Fc) were evaluated in the article. The developed estimation method of the impact of climatic factors and land cover structure on phenological indicators of forest stands allows visualizing and statistically evaluating these interactions. The spatial interactions between the above parameters are presented in the form of regressive coefficients of equations and of determination coefficients, reflecting their level and degree of connection for each year of the studied period. The regression analysis has identified moderate and sustained linear connection of investigated parameters on the territory of research for the entire time period under review. An overall analysis of climatic parameters trends for the researched period did not reveal any increase in average annual temperature or precipitation due to global climate change, but allowed to evaluate anomalous changes in the drought period of 2010.

Keywords*: forest monitoring, plant phenology, growing period, climate change, MODIS, GIS, NDVI, OLS.*

Введение

Усиливающееся антропогенное воздействие на лесные насаждения приводит к снижению их устойчивости, оценкой которой ежегодно занимаются ученые многих стран (Курбанов и

др., 2013; Nagendra et al., 2013; Stibig et al., 2014). Считается, что нарушения лесных насаждений, подвергшихся воздействию пожаров, засухи, повреждению вредителями и болезнями, непосредственно связаны с изменением климата (Kurbanov et al., 2007; Курбанов и др., 2008; IPCC…, 2014). Воздействие на лесные экосистемы происходит главным образом за счет изменения температуры, влажности атмосферного воздуха, осадков и гидротермического режима почв (Loboda et al., 2012; De Frenne et al., 2013). Установлено, что изменение климата может существенно нарушить фенологию растений путем влияния на их рост, развитие и ежегодное поглощение углерода лесами (Kurbanov, Post, 2002; Sanz-Perez et al., 2009). Поскольку зона умеренного пояса представлена в основном смешанными лесами, различия в фенологических реакциях могут оказать влияние на видовую конкуренцию растений (Курбанов и др., 2011; Crabbe et al., 2016).

В последнее время для решения задачи оценки воздействия климатических показателей на лесные насаждения значительное внимание уделяется данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Барталев и др., 2010; Курбанов и др., 2014). Американские ученые (Swain et al., 2011) провели оценку влияния климата и почвенного покрова на растительность на основе 25-летнего временного ряда вегетационного индекса Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) и данных об осадках. В результате работы выявлено, что низкие показатели осадков на западе бассейна реки Канзас приводят к повышению количества засухоустойчивых растений, тогда как их высокие значения говорят об увеличении видового разнообразия растительности. Российские ученые (Голубятников и др., 2005) провели оценку изменений первичной биологической продукции при возможных изменениях климата в XXI веке. В основе их метода лежит зависимость первичной биологической продукции от радиационного баланса на поверхности и испарения. Учеными выявлено, что при среднегодовом потеплении на 1°С, следует ожидать увеличения первичной биологической продукции на территории России.

Многие исследователи отмечают, что спутниковые приборы способны измерять масштабные изменения растительности, связанные с фенологическими фазами растений. В частности, изменения значений нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) могут быть использованы для составления карт динамики различных фенологических показателей (Beck et al., 2006). Спектральный вегетационный индекс NDVI позволяет определить момент начала и окончания активной фазы сезонного развития растительности (Jeong et al., 2009; White et al., 2009). Изменения вегетационных сезонов растений являются доминирующими показателями при выявлении реакции экосистем на изменение климата (Воробьёв и др., 2016).

Изменения в фенологии растений обычно связывают с несколькими климатическими факторами, такими как температура воздуха, влажность, тепло- и влагообеспеченность. Известно, что фенологический цикл умеренного климата контролируется температурой воздуха (Piao et al., 2006). Другие исследования (Brown, de Beurs, 2008) показывают, что изменения во влагообеспеченности растений могут привести к необратимым последствиям, особенно в засушливых регионах (Tikina, Kurbanov, 2012). Таким образом, долгосрочные изменения фенологических параметров объясняются главным образом изменениями температуры воздуха и количеством осадков в течение нескольких десятилетий.

В научной литературе значительное внимание также уделяется применению наборов глобальных климатических данных, необходимых для пространственно-временного анализа. Американские ученые (Yuan et al., 2014) получили ежемесячные климатические данные с использованием модели PRISM. Данный продукт представляет собой набор ежедневных, еженедельных и ежегодных данных о минимальной, средней, максимальной температурах, осадках и температуре точки росы, в первую очередь для всей территории США. Получен-

ные наборы данных включают несколько методов моделирования и доступны в различных пространственных и временных разрешениях, охватывающих период с 1895 года по настоящее время. В Российской Федерации разработана климатическая база данных WorldClim, которая представляет собой набор растровых изображений, каждый пиксель которых содержит информацию о различных климатических показателях (Егошин, 2013). К основным таким показателям относятся: минимальная, максимальная и средняя температура атмосферы; сумма осадков по каждому месяцу, а также цифровая модель рельефа.

Дальнейшее изучение проблемы влияния меняющегося климата на лесные насаждения приведет к совершенствованию методики оценки устойчивости лесных экосистем и прогнозированию их дальнейшего развития (Brown et al., 2010; Курбанов, Воробьев, 2014).

Цель исследований – оценка влияния меняющихся климатических факторов на фенологию лесных насаждений Среднего Поволжья по спутниковым данным.

Область исследования

Исследование взаимосвязи фенологических параметров и климатических переменных проводится на примере лесных насаждений Республики Марий Эл (РМЭ) (рис. 1).

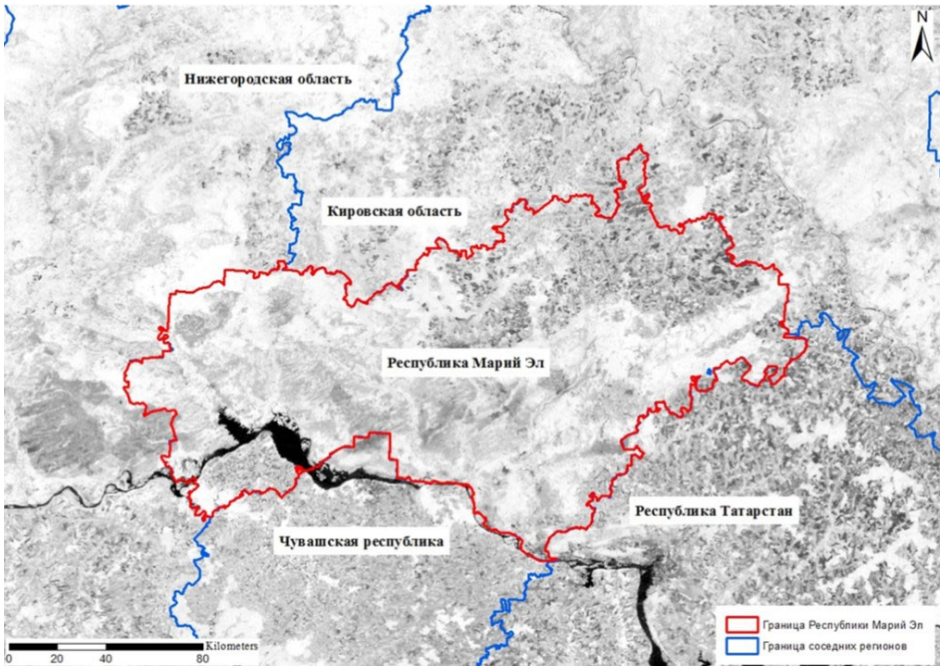


Рис. 1. Территория исследования

Материалы

В работе используются снимки спектрорадиометра MODIS, который выполняет съемку объектов поверхности Земли с периодичностью наблюдения один-два дня (Воробьев и др., 2015). Анализ сезонных значений вегетационного индекса NDVI проводится на основе модуля данных MOD13Q1. Этот модуль позволяет получить готовые композитные значения спектральных индексов изучаемой поверхности с пространственным разрешением 250 м. Значения индекса NDVI для исследуемой территории получены с интервалом в 16 дней за каждый вегетационный период (май - сентябрь) с 2000 по 2014 г. (Vegetation Indices…). Данные по температурной динамике подстилающей поверхности Земли (LST - Land Surface Temperature) за исследуемый период были получены на основе модуля данных MOD11C3, спектрорадиометра MODIS (MODIS/Terra Land Surface…). Период устойчивого вегетационного тренда принят из расчета постоянства плюсовых температур в 10°С (Миклашевич, Барталев, 2016). Средние значения по осадкам 2000-2014 гг. за исследуемый вегетационный период (май-сентябрь) получены на основе базы данных NASA (Giovanni, 2016).

Методика исследований

Представленный в настоящей статье метод дистанционной оценки влияния климатических факторов на фенологию лесных насаждений РМЭ включает в себя следующие этапы:

1 этап – Подготовка набора данных значений климатических показателей, значений NDVI и показателей пространственного распределения классов наземного покрова на территории исследования

Для получения значений изучаемых показателей (максимальная температура, осадки, состав наземного покрова и NDVI) и была сформирована регулярная сеть на территорию исследования с шагом ячейки – три километра, которая в дальнейшем накладывалась на растровые спутниковые изображения.

В исследовании все оцениваемые показатели определялись по данным значений, снятых с узлов (1537 точек) этой сети в пакете ArcGIS (рис. 2, 3).

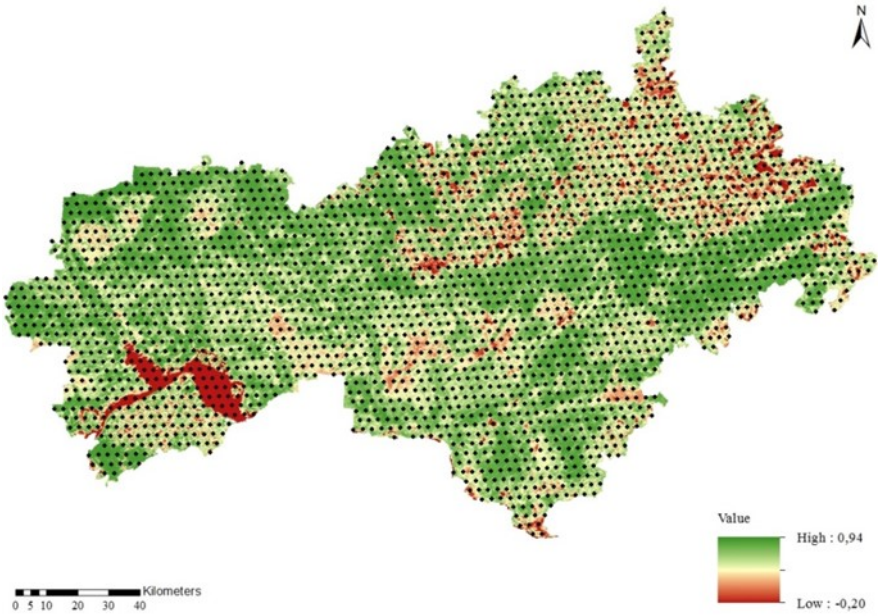


Рис. 2. Регулярная сеть на тематическом растровом слое NDVI (2014 г.), полученного со снимка Modis

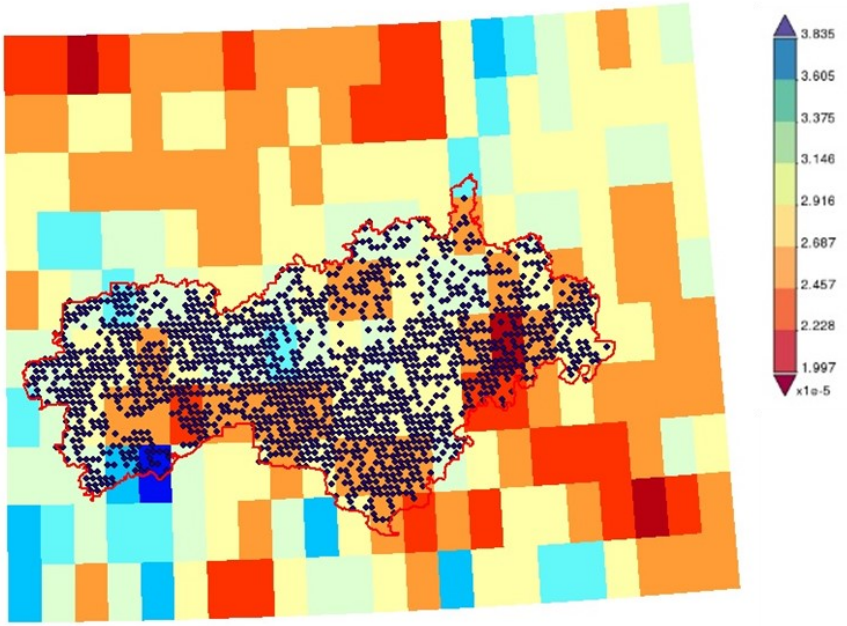


Рис. 3. Дифференциация РМЭ по количеству осадков (тематический растровый слой, кг·м$^{-2}$) за вегетационный период 2014 г. (май-сентябрь) по регулярной сети

Анализ пространственного распределения растительного покрова проводился по данным готовых тематических карт на основе снимков Landsat 2001 и 2014 гг., полученных Центром устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов (Губаев и др., 2012; Курбанов и др., 2015) (рис. 4).

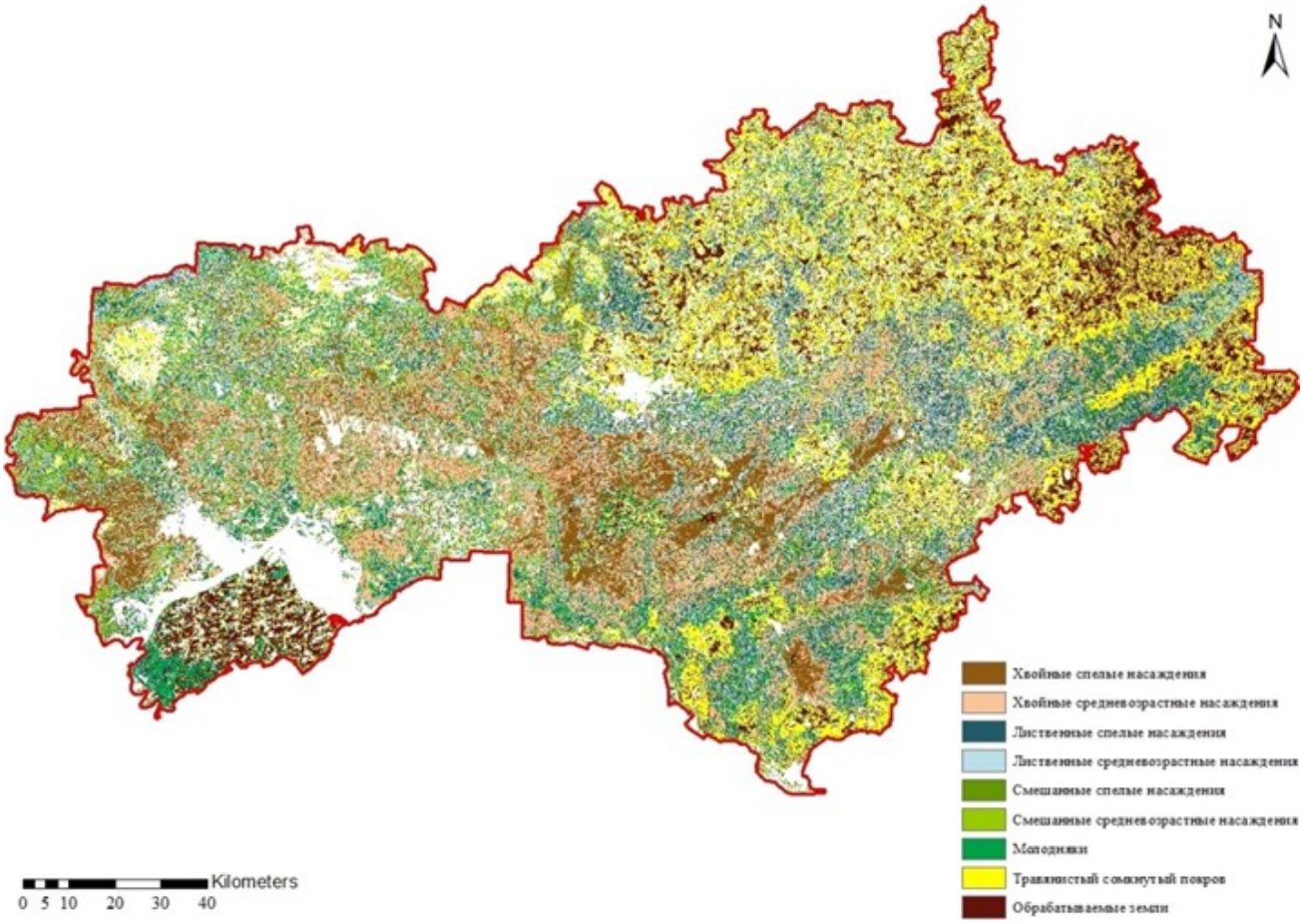


Рис. 4. Основные классы растительного покрова на тематической карте ЦУДМЛ, 2014 г.

Каждому представленному классу растительного покрова был присвоен индекс от 1 до 9, позволивший оценить связь их пространственных вариаций со значениями NDVI.

Таким образом, по данным точечной регулярной сети были получены фактические значения следующих показателей: температуры подстилающей поверхности LST (Land Surface Temperature) в виде максимальных (Tmax) за вегетационный период, количество осадков (Pr), пространственное распределение классов наземного покрова по тематическим картам 2001 и 2014 гг. и значения NDVI на территорию РМЭ за период с 2000 по 2014 гг.

2 этап – Регрессионный анализ пространственно-временных данных

Методы оценки взаимосвязей пространственно-временных природных и антропогенных факторов успешно решаются с применением современных средств диагностики и моделирования окружающей среды в программных пакетах ГИС (Hou et al., 2015; Серебрянная, 2012; Scheller, Mladenoff, 2008, Mitchel, 2005).

В качестве инструмента для моделирования пространственно-временной динамики климатических факторов и фенологических показателей лесного покрова была применена множественная линейная регрессия с использованием метода наименьших квадратов (Ordinary Least Squares, OLS), которая описывается уравнением

$$PM = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + ... + \beta_n X_n + \varepsilon \ , \quad (1)$$

где PM зависимая переменная; β_0, β_1, β_n - коэффициенты регрессии, X_1 X_n - независимые переменные, ε - случайные ошибки.

Аналогичные методы оценки пространственно-временных взаимодействий факторов среды и фенологического состояния растительного покрова в своих работах использовали многие исследователи (Xu et al., 2014; Scheller, Mladenoff, 2005; He et al., 2005).

По результатам регрессионного анализа в среде ArcGIS были получены уравнения регрессии по каждому году исследования, отражающие статистически значимые взаимосвязи между изучаемыми параметрами в виде уравнения:

$$NDVI = a - b \times T_{\max} - c \times \mathrm{Pr} - d \times Fc \quad , \tag{2}$$

где a – независимый коэффициент регрессии, b, c, d – коэффициенты независимых переменных, T_{max} – средние значения максимальных значений температур за период вегетации, Pr – осадки за вегетационный период, F_c – структура наземного покрова.

Анализ был проведен на уровне 95-процентной доверительной вероятности. Все расчетные коэффициенты в уравнении статистически значимы.

Результаты исследований

По результатам анализа регрессионных уравнений полученные тренды динамики фенологических показателей лесного покрова и климатических показателей за 14 летний период в основном показывают обратную связь с фитомассой (NDVI) за исследуемый период. Это подтверждают коэффициенты регрессии (табл. 1).

Таблица 1

Результаты регрессионного анализа

Год	a	b	c	d	OLS Adjusted R^2
2000	1,7958	-0,0279	-0,1381	-0,0079	0,36
2001	1,5670	-0,0227	-0,1043	-0,0082	0,38
2002	1,7190	-0,0270	-0,1242	-0,0131	0,51
2003	1,5474	-0,0347	-0,0005	-0,0075	0,42
2004	1,7257	-0,0359	-0,0363	-0,0088	0,43
2005	1,3903	-0,0314	0,0336	-0,0071	0,36
2006	1,3746	-0,0276	0,0178	-0,0063	0,40
2007	1,9118	-0,0373	-0,0723	-0,0075	0,37
2008	1,1223	-0,0260	0,0835	-0,0074	0,38
2009	1,9955	-0,0396	-0,1734	-0,0076	0,44
2010	1,5833	-0,0216	-0,1672	-0,0076	0,36
2011	1,6750	-0,0371	0,0006	-0,0083	0,47
2012	1,2026	-0,0239	0,0411	-0,0058	0,31
2013	1,6536	-0,0282	-0,1278	-0,0049	0,34
2014	1,5419	-0,0282	-0,0777	-0,0049	0,34

Примечание: a, b, c, d – коэффициенты регрессии, *Adjusted* R^2 – выравненный коэффициент детерминации

Результаты моделирования объясняют более 40 % вариации зависимой величины NDVI. Сложность в интерпретации результатов объясняется большой территорией исследования, в пределах которой кластеризация объектов наземного покрова представлена крайне неравномерно, что негативно сказывается на значениях выравненного коэффициента детерминации. Тем не менее, достаточно однородные результаты регрессии по каждому году исследования, за исключением аномально засушливого периода 2010 г., говорят о закономерных процессах, которые можно выявить и объяснить, пользуясь современными методами обработки пространственных данных. Улучшить результаты исследований можно, применив методы дифференциации большой площади исследования на более мелкие и достаточно однородные

участки. Подтверждение сделанным выводам продемонстрировано на тематических картах распределения значений средних NDVI, интерполированных методом «кригинг» в пакете ArcGis.

За период с 2000 по 2009 гг. общая динамика NDVI (фитомассы) на территории исследования имеет неоднородный характер. Часть минимальных значений NDVI и соответствующих значений B интерполированных стандартных отклонений представлены в северо-восточной части РМЭ, покрытой в основном землями сельскохозяйственных угодий и участками, зарастающими многолетними травами. Минимальные значения NDVI также встречаются на лесных территориях с преобладанием лиственных и смешанных пород, а также хвойных средневозрастных насаждений. Максимум накопления фитомассы (NDVI) за исследуемые 15 лет выявлен для территории центральной, южной и северо-западной частей республики, где сосредоточены спелые и перестойные насаждения хвойных и лиственных пород (рис. 5, 6).

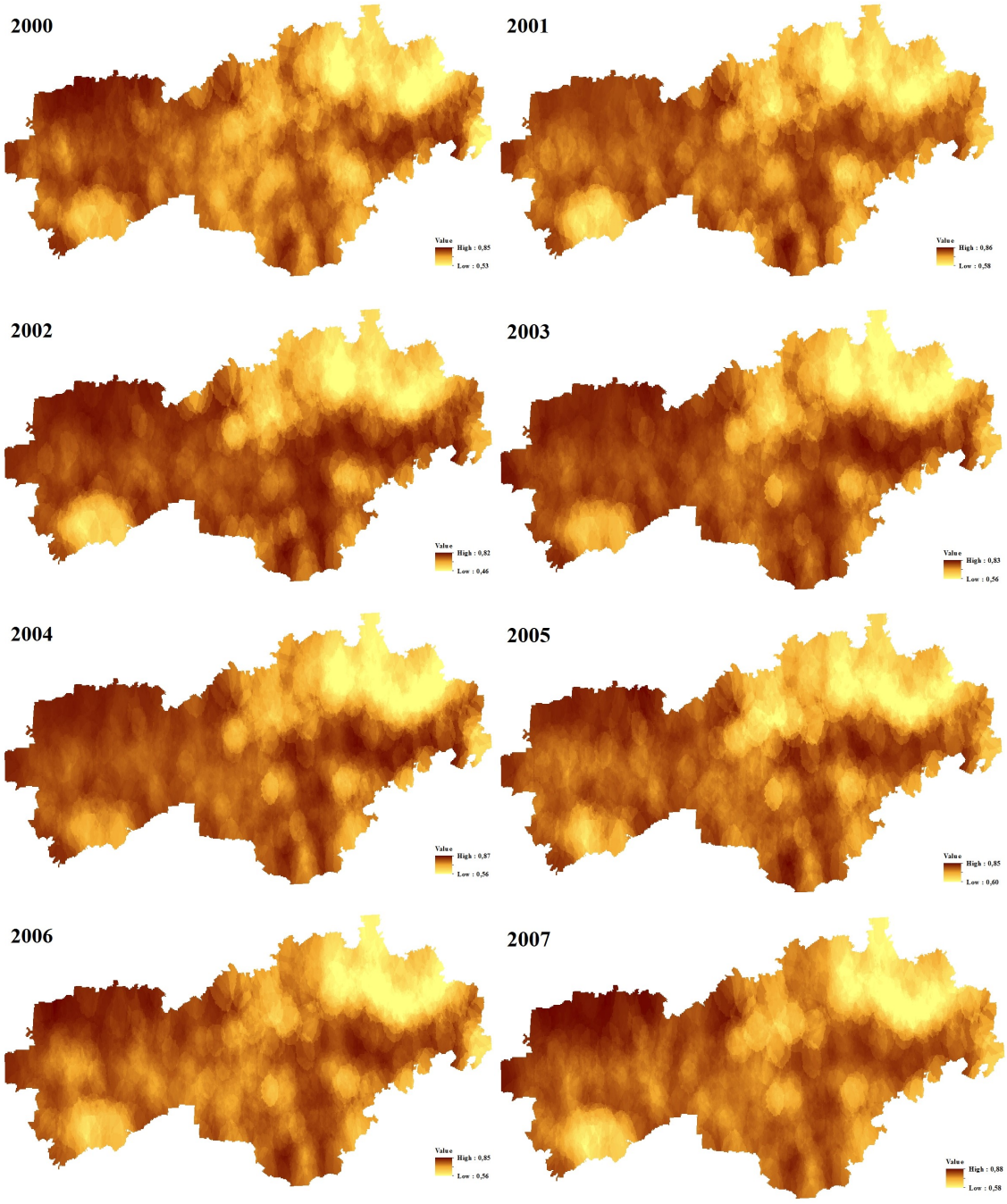


Рис. 5. Визуализация интерполированных значений NDVI, 2000-2007 гг.

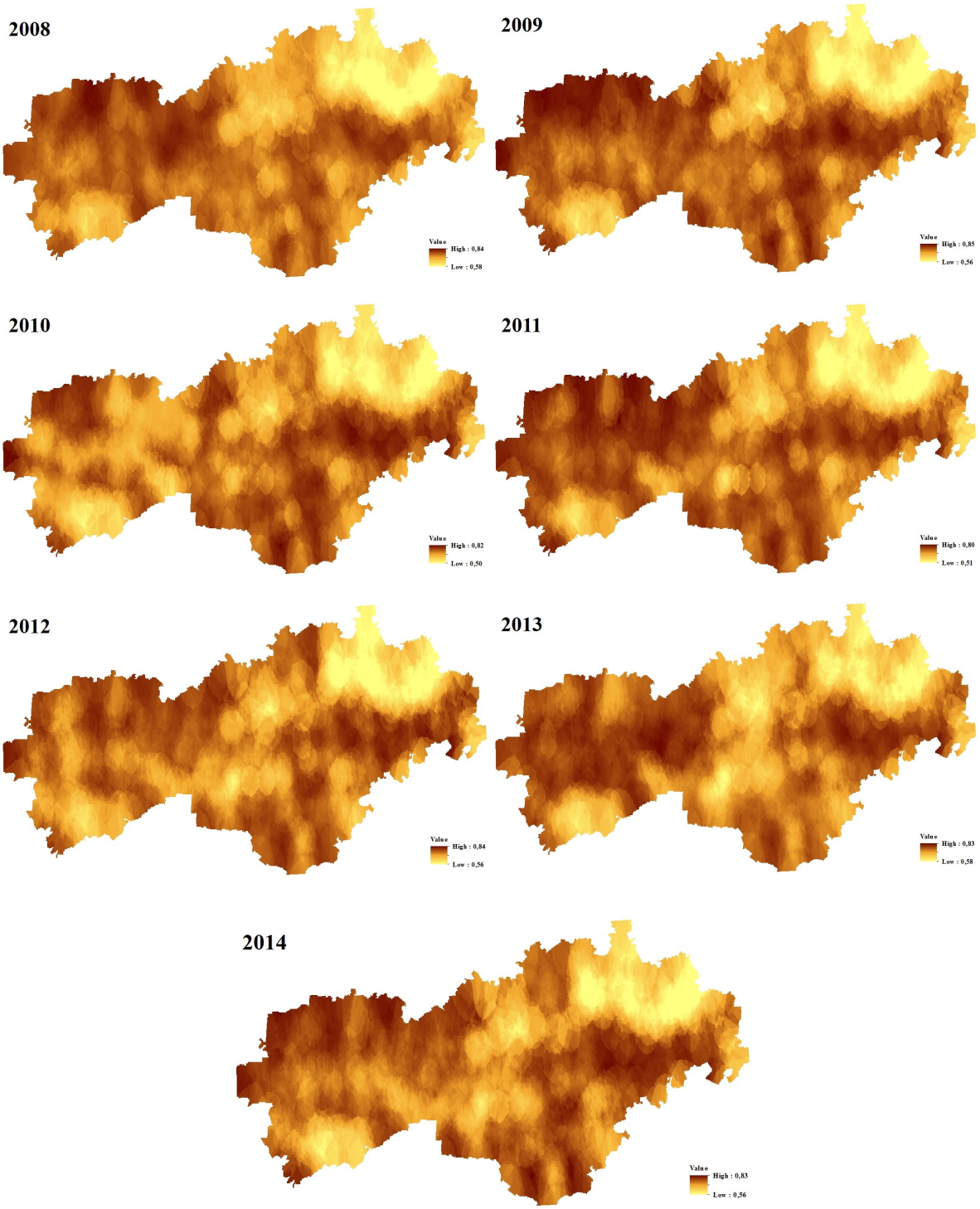


Рис. 6. Визуализация интерполированных значений NDVI, 2008-2014 гг.

Динамика средних значений NDVI и данных климатических показателей за исследуемые годы представлена на рисунке 7.

По результатам графического анализа (рис. 7) и по данным интерполяции NDVI (рис. 5, 6) можно сделать вывод о том, что непосредственное влияние на динамику фитомассы растительности РМЭ оказывает количество осадков. Отсутствие прямой корреляционной связи NDVI с показателем осадки, несмотря на их видимую синхронность, можно объяснить сложностью пространственных взаимосвязей (автокорреляцией), которые значительно отличаются от классических методов оценки статистических данных. Кроме того, на полученных изображениях (см. рис. 7) наблюдается некоторая асинхронность в динамике этих показате-

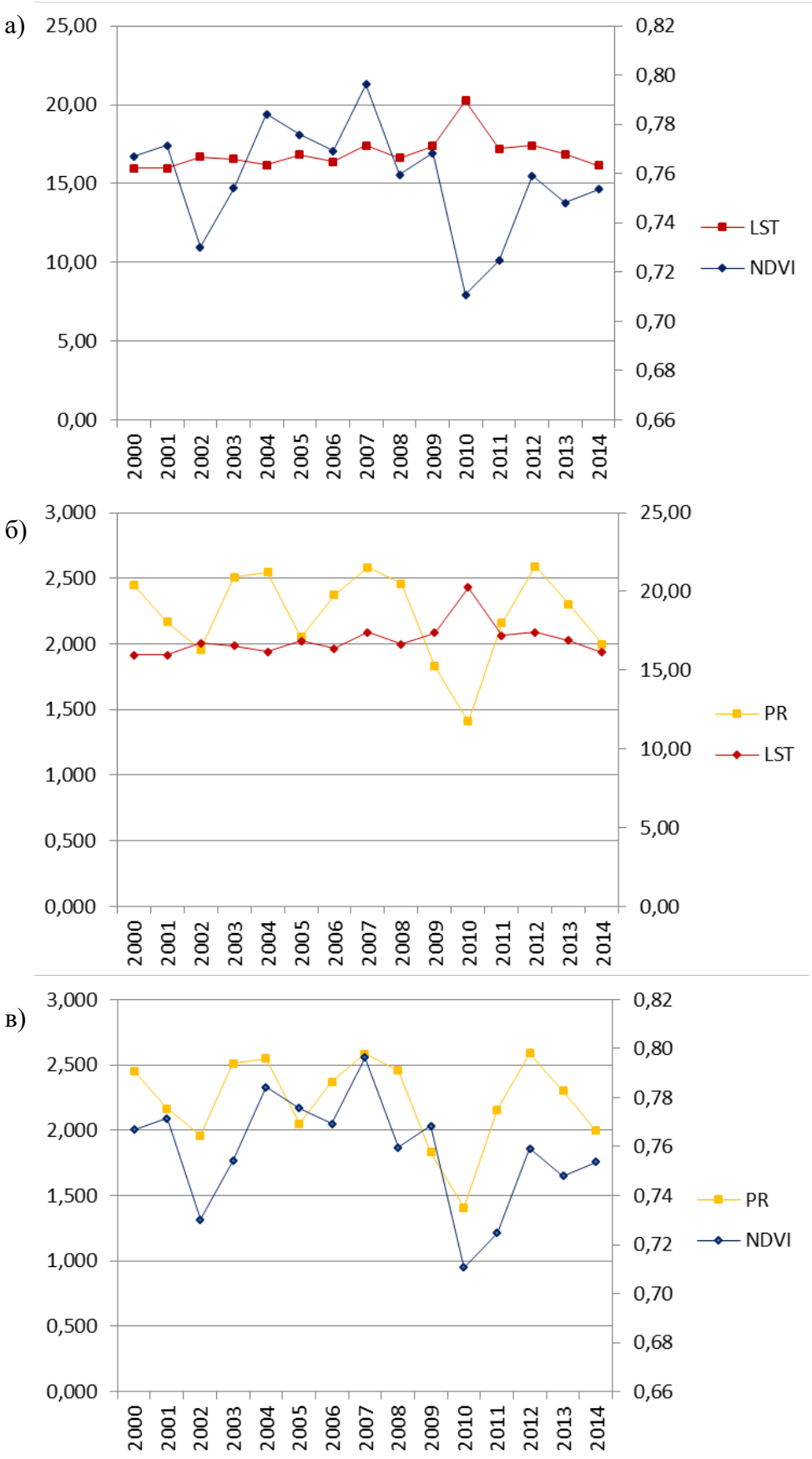


Рис. 7. Распределение среднемноголетних значений NDVI (а), температуры подстилающей поверхности LST (б) и осадков Pr (в) в РМЭ

лей, вызванная запаздыванием отклика растительного покрова на влияние осадков, что также отмечается и другими исследователями (Scheller, Mladenoff, 2005; He et al., 2005).

Возможность отслеживания аномалий природных явлений, их пространственные вариации и оценка степени влияния на растительный покров по данным дистанционного зондирования представлена в работе на примере засушливого сезона 2010 г. Анализ климатических данных сезона вегетации этого года показал значительные отклонения от стандартного тренда в сторону ухудшения практически всех оцениваемых нормативных показателей. Данный период характеризуется практически полным отсутствием осадков, в сравнении с предыдущими годами. В 2010 г. средне-сезонная температура повысилась почти на треть от среднего показателя за прошлые годы с одновременным увеличением длительности температурных аномалий. Засушливое лето 2010 г., также значительно повлияло на значения NDVI. В тот год наблюдалось явное снижение фитомассы на всей территории РМЭ. Особенно эти аномалии наблюдались в районах, где были выявлены максимальные нарушения в древесном пологе в результате сплошных пожаров 2010 г. (Воробьев и др., 2012). Восстановление обычного режима выпадения осадков и температур в последующие годы показывают карты интерполяции с 2011 по 2014 гг., а также графики динамики средних климатических показателей за этот период. Следует отметить, что анализ трендов климатических параметров за исследуемый период не выявил роста среднегодовых температур или осадков в связи с глобальными климатическими изменениями, как это отмечено в ряде работ зарубежных и отечественных авторов (Варламова, Соловьев, 2012; Zhou et al., 2003). Возможно, что это связано с изучаемым периодом времени.

Работа выполнена по проекту № 2394 «Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем» в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации 2014-2016 гг.

Библиографический список

1. Барталев, С.А. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений / С.А. Барталев, В.А. Егоров, А.М. Крылов, Ф.В. Стыценко, Т.С. Ховратович // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – № 3. – С. 215-225.

2. Варламова, Е.В. Исследование динамики индекса растительности арктической зоны Восточной Сибири по спутниковым данным / Е.В. Варламова, В.С. Соловьев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – № 1. – С. 65-70.

3. Воробьев, О.Н. Методика пошаговой классификации спутниковых снимков для тематического картирования лесов / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, Е.Н. Демишева // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 4(28). – С. 57-69.

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

5. Голубятников, Л.Л. Модельные оценки влияния изменений климата на растительный покров и сток углерода из атмосферы / Л.Л. Голубятников, И.И. Мохов, Е.А. Денисенко, В.А. Тихонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 41. – №. 1. – С. 25-35.

6. Губаев, А.В. Мониторинг и прогнозирование состояния лесных насаждений методами дистанционного зондирования / А.В. Губаев, Э.А. Курбанов, О.Н. Кранкина, О.Н. Воробьев // Влияние аномальной погоды на природные, социально-экономические и искусственные системы: засуха 2010 года в Поволжье России: материалы международной научной конференции NASA и семинара GOFC-GOLD/NEESPI. − Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2012. – С. 92-98.

7. Егошин, А.В. Моделирование пространственного распределения видов на территориях ООПТ Западного Кавказа с использованием геоинформационных систем / А.В. Егошин // Биоразнообразие государственного природного заповеданка «Утриш»: научные труды. – Сочи, 2013. – Т. 1. – С. 35-43.

8. Как работает инструмент Кригинг (Kriging) [Электронный ресурс]. – URL: http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm. – 15.11.2016.

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

10. Курбанов, Э.А. Лесоводство. Международное лесное хозяйство: учебное пособие / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев/ Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. – 254 с.
11. Курбанов, Э.А. Опыт сохранения уникальных лесов и биологического разнообразия в национальных парках западного побережья США / Э.А. Курбанов, М.А. Яцков, О.Н. Воробьёв, А.В. Губаев, С.А. Лежнин // Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2011. – № 1.– С. 99-107.
12. Курбанов, Э.А. Оценка загрязнений древостоев отходами силикатного производства по снимку Rapid Eye / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьёв, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т.10. – № 2. – С. 88-97.
13. 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.
14. 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.
15. Миклашевич, Т.С. Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных / Т.С. Миклашевич, С.А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 1. – С. 9-24.
16. Серебрянная, О.Л. Регрессионный анализ пространственных данных помогает ответить на вопрос «ПОЧЕМУ?» [Электронный ресурс] / О.Л. Серебрянная // ArcReview. – 2012. – Т. 63. – № 4. – URL: www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=8329&SECTION_ID=265. – 10.11.2016.
17. Beck, P.S. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI / P.S. Beck, C. Atzberger, K.A. Hogda, B. Johansen, A.K. Skidmore // Remote sensing of Environment. – 2006. – Vol. 100. – №. 3. – P. 321-33.
18. Brown, M.E. Evaluation of multi-sensor semi-arid crop season parameters based on NDVI and rainfall / M. E. Brown and K. M. de Beurs // Remote Sensing of Environment. – 2008. – Vol. 112. – №. 5. – P. 2261-2271.
19. Brown, M.E. The response of African land surface phenology to large scale climate oscillations / M. E. Brown, K. de Beurs, A. Vrieling // Remote Sensing of Environment. – 2010. – Т. 114. – №. 10. – С. 2286-2296.
20. Crabbe, R.A. Extreme warm temperatures alter forest phenology and productivity in Europe / R.A. Crabbe, J. Dash, V.F. Rodriguez-Galiano, D. Janous, M. Pavelka, M.V. Marek // Science of The Total Environment. – 2016. – Vol. 563. – P. 486-495.
21. De Frenne, P. Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming / P. De Frenne, F. Rodríguez-Sánchez, D. A. Coomes, L. Baeten, G. Verstraeten, M. Vellend, M. Bernhardt-Römermann, C.D. Brown et al. // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2013. – Vol. 110. – №. 46. – P. 18561-18565.
22. Giovanni. The Bridge Between Data and Science v 4.21.6. [Electronic resource]. – URL: http:// giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/. – 13.11.2016.
23. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014–Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects. – Cambridge University Press, 2014.
24. He, H.S. Simulating forest ecosystem response to climate warming incorporating spatial effects in north-eastern China / H.S. He, Z. Hao, D.J. Mladenoff, G. Shao, Y. Hu, Y. Chang // Journal of Biogeography. – 2005. – Т. 32. – №. 12. – С. 2043-2056.
25. Hou, W. Interannual variations in growing-season NDVI and its correlation with climate variables in the southwestern karst region of China / W. Hou, J. Gao, S. Wu, E. Dai // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7. – №. 9. – P. 11105-11124.
26. Jeong, S.J. Increase in vegetation greenness and decrease in spring time warming over East Asia / S.J. Jeong, C.H. Ho, J.H. Jeong // Geophysical Research Letters. – 2009. – Vol. 36. – №. 2. – L02710.
27. Kurbanov, E. Carbon sequestration after pine afforestation on marginal lands in the Povolgie region of Russia: A case study of the potential for a Joint Implementation activity / E. Kurbanov, O. Vorobiev, A. Gubayev, L. Moshkina, S. Lezhnin // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2007. – № 22. – P. 488-499.
28. 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.
29. 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.
30. Mitchel, A. The ESRI Guide to GIS analysis, Volume 2: Spartial measurements and statistics / A. Mitchel // ESRI Guide to GIS analysis. – 2005.
31. MODIS/Terra Land Surface Temperature and Emissivity Monthly L3 Global 0.05Deg CMG. MOD11C3 [Electronic resource]. – URL: lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod11c3. – 15.11.2016.
32. Nagendra, H. Remote sensing for conservation monitoring: assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats / H. Nagendra, R. Lucas, J.P. Honrado, R.H. Jongman, C. Tarantino, M. Adamo, P. Mairota //Ecological Indicators. – 2013. – Vol. 33. – P. 45-59.
33. Piao, S. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation / S. Piao, J. Fang, L. Zhou, P. Ciais, B. Zhu // Global Change Biology. – 2006. – Vol. 12. – №. 4. – P. 672-685.
34. Sanz-Perez, V. Differential and interactive effects of temperature and photoperiod on budburst and carbon reserves in two co-occurring Mediterranean oak / V. Sanz-Pérez, P. Castro-Díez, F. Valladares // Plant Biology. – 2009. – Т. 11. – №. 2. – С. 142-151.

35. Scheller, R.M. A spatially interactive simulation of climate change, harvesting, wind, and tree species migration and projected changes to forest composition and biomass in northern Wisconsin, USA / R.M. Scheller, D.J. Mladenoff //Global Change Biology. – 2005. – Т. 11. – № 2. – С. 307-321.
36. Scheller, R.M. Simulated effects of climate change, fragmentation, and inter-specific competition on tree species migration in northern Wisconsin, USA / R.M. Scheller, D.J. Mladenoff //Climate Research. – 2008. – Т. 36. – №. 3. – С. 191-202.
37. Stibig, H.J. Change in tropical forest cover of Southeast Asia from 1990 to 2010 / H.J. Stibig, F. Achard, S. Carboni, R. Raši, J. Miettinen // Biogeosciences. – 2014. – Vol. 11. – №. 2. – P. 247-258.
38. Swain, S. Assessment of vegetation response to drought in Nebraska using Terra-MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index / S. Swain, B.D. Wardlow, S. Narumalani, T. Tadesse, K. Callahan // GIScience & Remote Sensing. – 2011. – Vol. 48. – №. 3. – P. 432-455.
39. Tikina, A.V. Extreme weather events and long-term forestry obligations: is reliance on forest certification possible? / 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, GOFC-GOLD and NEESPI Workshop and Regional Conference [Electronic resource]. – Yoshkar-Ola: Volga Tech, 2012. – P. 145-148. − URL: http://csfm.marstu.net/publications.html.
40. Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m. MOD13Q1 [Electronic resource]. – URL: lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1. – 15.11.2016.
41. White, M.A. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006 / M.A. White, K. de Beurs, K. Didan, D.W. Inouye, A.D. Richardson, O.P. Jensen, J.O. Keefe, G. Zhang, R.R. Nemani, W.J.D. Van Leeuwen, J.F. Brown, A. De Wit, M. Schaepman, X. Lin, M. Dettinger, A.S. Bailey, J. Kimball, M.D. Schwartz, D.D. Baldocchi, J.T. Lee, W.K. Lauenroth // Global Change Biology. – 2009. – Vol. 15. – №. 10. – P. 2335-2359.
42. Xu, G. Changes in vegetation growth dynamics and relations with climate over China's landmass from 1982 to 2011 / G. Xu, H. Zhang, B. Chen, H. Zhang, J.L. Innes, G. Wang, J. Yan, Y. Zheng, Z. Zhu, R.B. Myneni // Remote Sensing. – 2014. – Vol. 6. – №. 4. – P. 3263-3283.
43. Yuan, F. Spatial patterns of land surface phenology relative to monthly climate variations: US Great Plains / F. Yuan, C. Wang, M. Mitchell // GIScience & Remote Sensing. – 2014. – Vol. 51. – №. 1. – P. 30-50.
44. Zhou, L. Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999 / L. Zhou, R. K. Kaufmann, Y. Tian, R.B. Myneni, C.J. Tucker // Journal of Geophysical Research: atmospheres. – 2003. – Vol. 108. – № D1.

УДК 528.88

МОНИТОРИНГ ЗАРАСТАЮЩИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ ПО СНИМКАМ LANDSAT-8

С.А. Лежнин
Поволжский государственный технологический университет

В статье изложены результаты исследования залежей, зарастающих древесными породами, по спутниковым снимкам Landsat 8. Использование спутниковой информации в подобных исследованиях является приоритетным направлением, т.к. современное развитие технологий позволяет оценивать большие площади при минимальных финансовых и людских трудозатратах. Для исследования бывших сельскозяйственных угодий используются разновременные снимки среднего и высокого разрешения, различные вегетационные индексы и другие подходы. Установлено, что использование весенних снимков в сочетании 6, 5 и 2 спектральных каналов Landsat-8 является оптимальным для оценки зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель Республики Марий Эл. Именно в данном сочетании молодняки древесных пород имеют хорошее спектральное разделение с сельскохозяйственными территориями без применения дополнительных преобразований. Коэффициент Каппа, имеющий для весенних снимков значение 0,66-0,67, говорит о хорошей согласованности тематических карт и натурных данных. Анализ полученных в исследовании тематических карт показал, что по своим спектральным характеристикам хвойные молодняки хорошо выделяются на бывших сельскохозяйственных землях (перемешивание классов всего 3,9%), а лиственные молодняки, наоборот, более подвержены смешиванию как с хвойными молодняками, так и сельскохозяйственными культурами, что отражается в 29,25% перемешивании классов. Это объясняется тем, что на весенних снимках травянистая растительность либо покрыта снеговым покровом, либо имеет значительно отличающиеся от древесной растительности спектральные характеристики. Кроме того, в весенний период в Марий Эл

встречается множество участков, на которых травянистая растительность отсутствует из-за осенней вспашки.

Ключевые слова: *залежи, спутниковые снимки, спектральный канал, тематические карты, оценка точности, Landsat.*

MONITORING OF REFORESTATION ON ABANDONED AGRICULTURAL LANDS IN REPUBLIC MARI EL USING LANDSAT-8 IMAGES

S.A. Lezhnin
Volga State University of Technology

The article presents the investigation results of abandoned agricultural lands, overgrown by tree species, using satellite Landsat 8 images. The satellite data usage in similar researches is a priority, as the modern technology development allows evaluating large areas at the minimum financial and labor efforts. The multi-temporal images of medium and high resolution, various vegetation indexes and other approaches are used to investigate the former agricultural lands. It has been established that the use of spring images in combination of spectral channels 6, 5 and 2 of Landsat-8 is optimal for estimation of overgrowing of abandoned agricultural lands of the Mari El Republic. In this particular combination the young stands of tree species have good spectral separation from the agricultural areas without the use of additional transformations. The Kappa coefficient, having a value from 0.66 to 0.67 for spring images, indicates a good consistency of thematic maps and field data. Analysis of thematic maps, obtained in the research, showed that by its spectral characteristics the coniferous young stands are well allocated on former agricultural lands (mixing of classes is only 3.9%), and deciduous saplings, conversely, are more susceptible to mixing both with of coniferous young stands and agricultural crops, which is reflected in the mixing of classes on 29,25%. The reason is that the herbaceous vegetation on spring Landsat images is covered with snow cover or it has spectral characteristics that are significantly different from woody vegetation. In addition, during the spring period in Mari El there are many plots where herbaceous vegetation is absent because of the autumn plowing.

Keywords*: abandoned agricultural lands, satellite images, spectral channel, thematic maps, accuracy assessment, Landsat.*

Введение. Экономическая ситуация в России и за рубежом привела в последние годы к тому, что на значительных площадях необрабатываемых сельскохозяйственных угодий происходит смена экосистем с сельскохозяйственных на лесорастительные. Этот процесс имеет как отрицательные (снижение площадей для выращивания сельхоз культур в условиях глобальной продовольственной проблемы), так и положительные моменты (древесные породы восстанавливают водный и почвенный баланс на территории, имеется возможность для развития побочного лесопользования: сбор грибов, ягод, охота).

Изучение и оценка зарастающих сельскохозяйственных площадей является важной задачей для народного хозяйства Российской Федерации (№6-ФЗ «О внесении изменений…», ч. 1.1., ст. 8.8.). Использование спутниковой информации в подобных исследованиях является приоритетным направлением, т.к. современное развитие технологий позволяет оценивать большие площади при минимальных финансовых и людских трудозатратах (Хлюстов, 2011; Курбанов и др., 2014; Воробьев и др., 2016). Для исследования бывших сельскозяйственных угодий обычно используются разновременные снимки среднего и высокого разрешения, различные вегетационные индексы и другие подходы (Johansson, 2007; Lucas et al., 2007; Pinto, Fernandes, 2011; Prishchepov, 2012; Loboda et al., 2016).

Большую работу по изучению зарастающих залежей проделал научный коллектив центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов ФГБОУ ВО «ПГТУ» под ру-

ководством проф. Э.А. Курбанова (Курбанов и др., 2010а). Были исследованы площади зарастания заброшенных сельскохозяйственных угодий Среднего Поволжья древесными породами (накопление фитомассы) с использованием методов дистанционного зондирования (Курбанов и др., 2010б; Курбанов и др., 2008; Курбанов и др., 2011; Лежнин, Акбаров, 2014; Лежнин, 2015). Тем не менее, проблема поиска оптимальной методики решения проблемы изучения зарастающих залежей остается открытой.

Целью исследования было найти оптимальное сочетание каналов спутниковых снимков Landsat 8 для выявления молодняков древесных пород на бывших сельскохозяйственных угодьях Республики Марий Эл. Для достижения данной целы были решены следующие **задачи**:

- подобраны безоблачные снимки спутника Landsat 8 на исследуемую территорию за несколько временных периодов;
- использованы несколько сочетаний спектральных каналов снимков Landsat 8 для выявления их оптимального для проведения исследований;
- проведено тематическое картирование подобранных трехканальных снимков;
- сделаны выводы по наиболее оптимальному сочетанию спектральных каналов спутниковых снимков Landsat 8 для выявления древесной растительности на сельскохозяйственных территориях.

Объектом исследования выступили залежи северной части Республики Марий Эл, попадающие внутрь сцены 171-20 спутника Landsat 8.

Материалы и методы. В основу исследования был положен анализ тематических карт, полученных методом управляемой классификации спутниковых снимков Landsat 8 с пространственным разрешением 30 м в различных комбинациях спектральных каналов, которые были получены с базы данных NASA (USGS Global…). Оценка точности разработанных тематических карт позволила выявить оптимальное сочетание спектральных каналов спутниковых снимков и время съемки.

Для работы были выбраны спутниковые снимки Landsat 8 (сцена 171-20) за три временных периода: весенние снимки (начало мая 2016 г.), летние снимки (июль 2016 г.) и осенние снимки (сентябрь 2016 г.) (табл. 1, рис. 1, 2). Все снимки прошли процедуру атмосферной коррекции в модуле FLAASH программного обеспечения ENVI-5.2 для снижения влияния атмосферных явлений на точность исследования.

Таблица 1

Снимки Landsat 8, использованные в исследовании

Условное обозначение снимка	Дата съемки	Сочетание спектральных каналов*
Spring_652	Май 2016	6-5-2
Spring_654		6-5-4
Spring_751		7-5-1
Summer_652	Июль 2016	6-5-2
Summer_654		6-5-4
Summer_751		7-5-1
Autumn_652	Сентябрь	6-5-2
Autumn_654		6-5-4
Autumn_751		7-5-1

Примечание: 1 – спектральный канал «побережья и аэрозоли»; 2 – синий канал; 4 – красный канал; 5 – ближний инфракрасный, NIR; 6 – коротковолновый ближний инфракрасный, SWIR2; 7 – коротковолновый ближний инфракрасный, SWIR3.

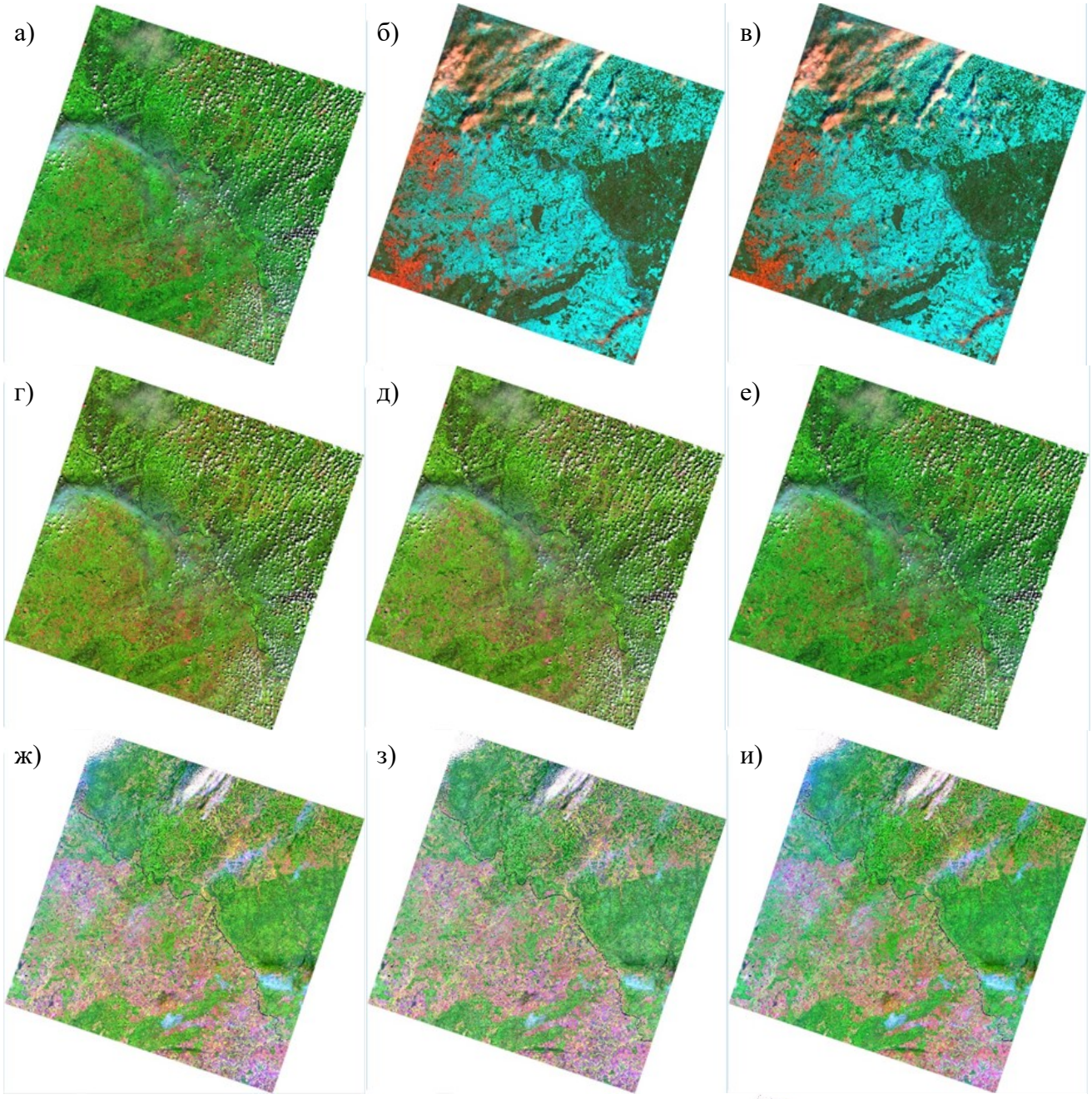


Рис. 1. Снимки спутника Landsat 8, использованные в исследовании: а) Spring_652; б) Spring_654; в) Spring_751; г) Summer_652; д) Summer_654; е) Summer_751; ж) Autumn_652; з) Autumn_654; и) Autumn_751

Спектральные каналы были подобраны исходя из их оптимальной применимости для исследования сельскохозяйственных культур (6-5-2), лесных сообществ (6-5-4) и открытых почв (7-5-1) (Интерпретация комбинаций каналов…).

Для тематического картирования методом управляемой классификации (maximum likelihood) и оценки полученных карт были использованы данные, собранные за полевой сезон 2007-2015 гг. на залежах Республики Марий Эл (Лежнин, 2013). В процессе тематиче-

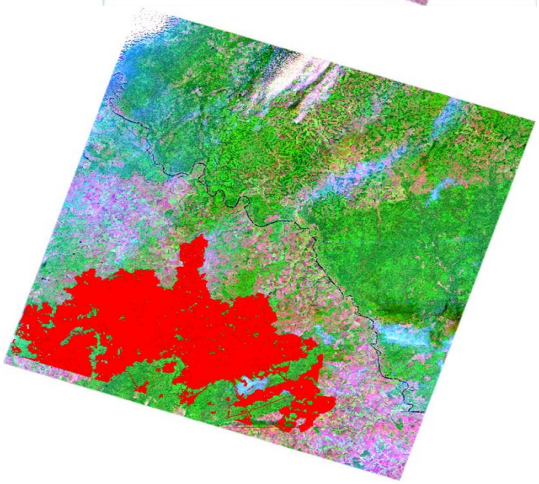


Рис. 2. Пример снимка Landsat 8 с наложенной маской территории исследования (красный цвет)

ского картирования на каждом исследуемом снимке были выделены три класса: собственно сельскохозяйственные земли (в т.ч. неиспользуемые), молодняки хвойных пород, молодняки лиственных пород.

Результаты. В ходе тематического картирования было получено 10 карт за несколько временных периодов (рис. 3).

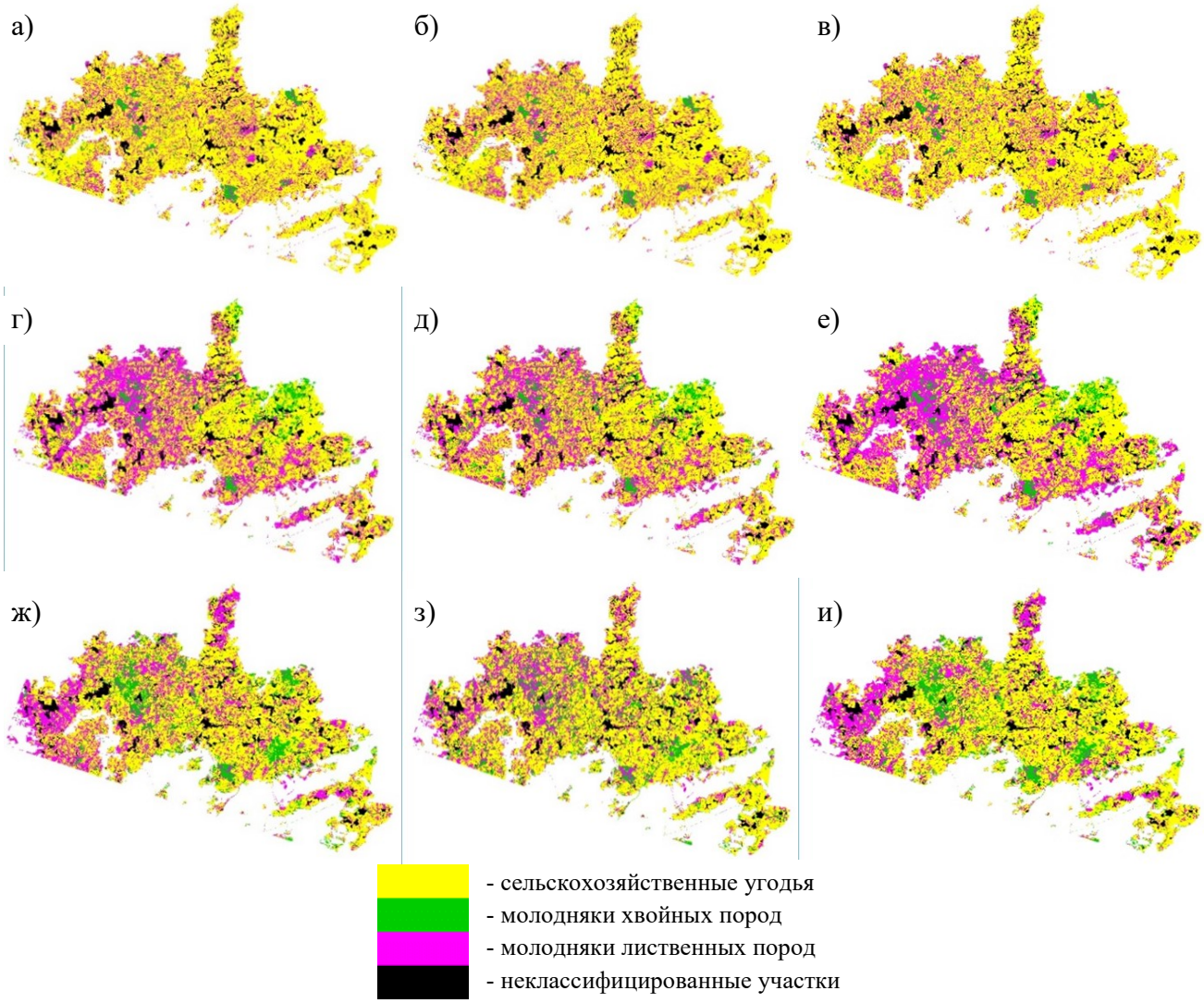


Рис. 3. Тематические карты, полученные по соответствующим снимкам спутника Landsat 8: а) Spring_652; б) Spring_654; в) Spring_751; г) Summer_652; д) Summer_654; е) Summer_751; ж) Autumn_652; з) Autumn_654; и) Autumn_751

Оценка полученных тематических карт проводилась с использованием контрольных точек, полученных на тестовых участках, с определением коэффициента Каппа (*k*) (табл. 2).

Как видно из таблицы, наибольшую точность показала тематическая карта, полученная по весеннему снимку в сочетании 6-5-2 спектральных каналов. Это объясняется тем, что на весенних снимках травянистая растительность либо покрыта снеговым покровом, либо по спектральным характеристикам значительно отличается от древесной растительности. Кроме того, в весенний период встречаются участки залежей, на которых растительность отсутствует из-за осенней вспашки. Коэффициент Каппа, имеющий для весенних снимков значение 0,66-0,67, говорит о хорошей согласованности тематических карт и натурных данных (Курбанов и др., 2015).

Тематические карты, основанные на летних снимках, имеют высокую общую точность, однако довольно низкий коэффициент Каппа. Такое положение можно объяснить тем, что в

Таблица 2

Точность полученных тематических карт

Тематическая карта	Общая точность, %	Коэффициент Каппа (*k*)
Spring_652	87,89	0,67
Spring_654	86,87	0,66
Spring_751	87, 55	0,67
Summer_652	79,67	0,41
Summer_654	79,62	0,39
Summer_751	74,9	0,34
Autumn_652	65,93	0,16
Autumn_654	65,20	0,15
Autumn_751	67,42	0,19

середине лета травянистая растительность выходит на пик своей вегетационной активности, потому её спектральные характеристики будут близки к характеристикам молодой древесной растительности. При этом в процессе классификации происходит перемешивание спектральных значений классов тематической карты. Лучшую согласованность с данными полевых исследований показывают спутниковые снимки в сочетании 6-5-2 спектральных каналов на летних изображениях Landsat-8 (k>0,4).

Слабые результаты показали осенние снимки. Они имеют среднюю общую точность, а значение коэффициента Каппа свидетельствует о низкой согласованности тематических карт с натурными данными (k<0,4).

Кроме оценки с помощью коэффициента Каппа, полученные тематические карты были сравнены с «эталонной» картой зарастания залежей Республики Марий Эл, полученной в предыдущих исследованиях методом неуправляемой классификации спутниковых снимков после процедуры MNF-трансформации (Лежнин, 2013) (рис. 4).

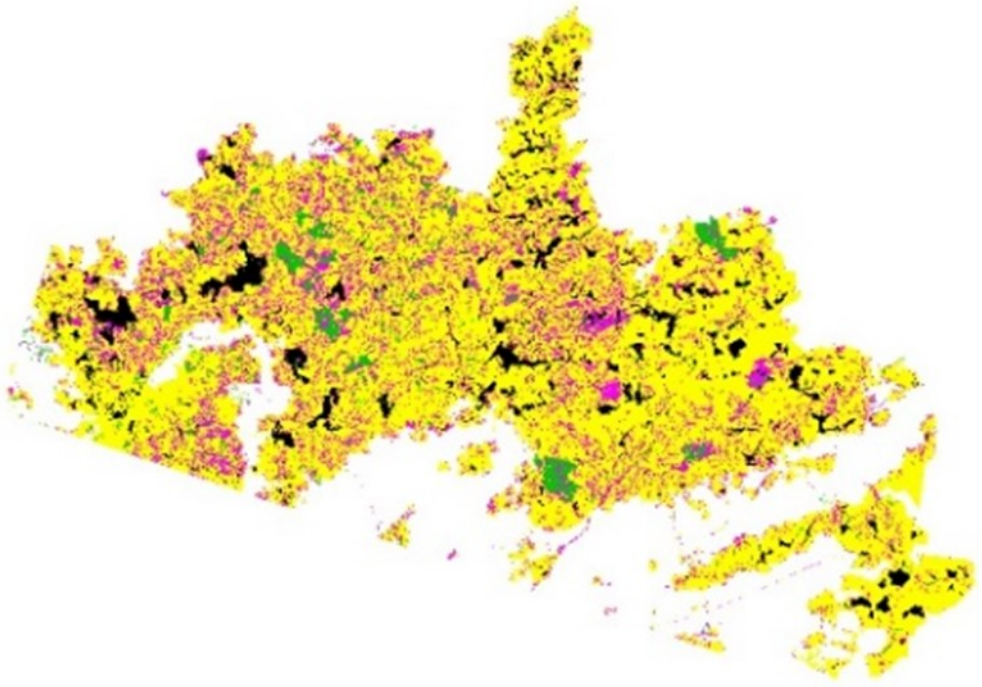
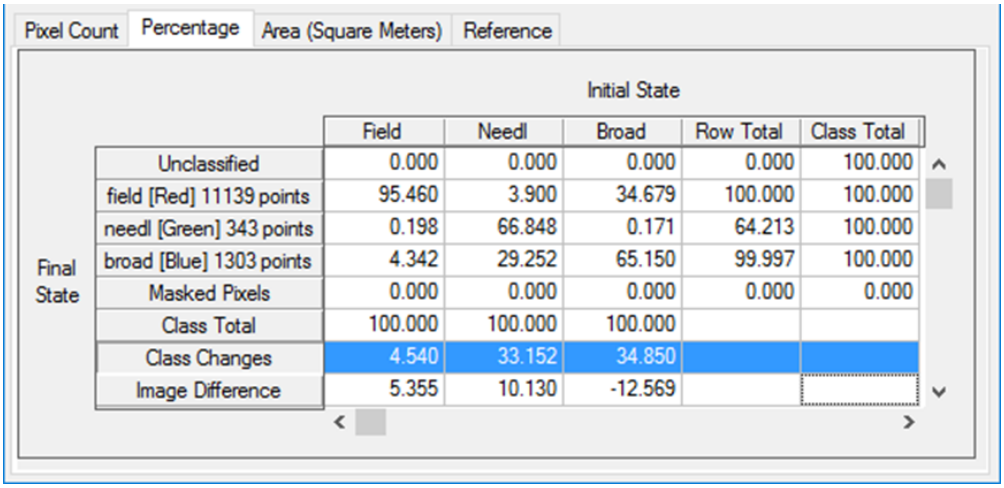


Рис. 4. «Эталонная» карта 2015 г.

Сравнение «эталонной» карты с тематическими картами, полученными в исследовании, проводилось с помощью модуля Change Detection программного обеспечения ENVI-5.2. Данная процедура позволила оценить не только соответствие полученных тематических классов натурным данным, но и выявить пространственное смешивание тематических классов. При этой оценке наилучшую точность вновь показала тематическая карта, основанная на весеннем снимке в сочетании 6-5-2 спектральных каналов (рис. 5).



Final State	Field	Needl	Broad	Row Total	Class Total
Unclassified	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
field [Red] 11139 points	95.460	3.900	34.679	100.000	100.000
needl [Green] 343 points	0.198	66.848	0.171	64.213	100.000
broad [Blue] 1303 points	4.342	29.252	65.150	99.997	100.000
Masked Pixels	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Class Total	100.000	100.000	100.000		
Class Changes	4.540	33.152	34.850		
Image Difference	5.355	10.130	-12.569		

Рис. 5. Сравнение «эталонной» карты с картой Spring_652

Как видно на рисунке 5, класс Field (собственно сельскохозяйственные земли) практически полностью совпадает на обеих картах (точность попадания в класс 95,46%), тогда как классы Needl (хвойные молодняки) и Broad (лиственные молодняки) имеют более низкую точность попадания в свой класс (66,85% и 65,15% соответственно). При этом видно, что хвойные молодняки хорошо разделяются с сельскохозяйственными культурами (перемешивание классов всего 3,9%), но обладают схожими с лиственными молодняками спектральными характеристиками, что отражается в 29,25% перемешивания классов. Лиственные молодняки, наоборот, имеют высокое перемешивание с классом сельскохозяйственных земель из-за схожих спектральных характеристик, что подтверждается также ранее проведенным исследованиям (Лежнин, 2013).

Остальные тематические карты показали большие расхождения с «эталонной» картой, однако общая тенденция прослеживалась и там: по своим спектральным характеристикам хвойные молодняки хорошо выделяются на сельскохозяйственных землях, а лиственные молодняки, наоборот, более подвержены смешиванию как с хвойными молодняками, так и сельскохозяйственными культурами.

Выводы. Исследование и оценка залежей, зарастающих древесной растительностью, является приоритетной задачей как для сельского, так и для лесного хозяйства. Важнейшей информацией, которая может быть использована для решения этой задачи, служит спутниковая информация, которая позволяет в короткие сроки и с минимальными затратами проводить оценку значительных территорий сельскохозяйственных угодий. Для оценки распространения молодняков хвойных и лиственных пород на сельскохозяйственных угодьях Республики Марий Эл оптимальнее всего использовать весенние снимки Landsat 8 в сочетании 6, 5 и 2 спектральных каналов. Именно в данном сочетании молодняки древесных пород имеют хорошее спектральное разделение с сельскохозяйственными территориями без применения дополнительных преобразований.

Работа выполнена по проекту № 2394 «Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем» в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации 2014-2016 гг.

Библиографический список

1. Интерпретация комбинации каналов данных Landsat TM/ETM+ [Электронный ресурс]. – URL: http://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html. – 18.11.2016.
2. Воробьев, О.Н. Методика пошаговой классификации спутниковых снимков для тематического картирования лесов / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, Е.Н. Демишева // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 4(28). – С. 57-69.
3. Курбанов, Э.А. Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье / Э.А. Курбанов, Т.В. Нуреева, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Т.Ф. Мифтахов, С.А. Незамаев, Ю.А. Полевщикова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2011. – № 3. – С. 17-24.
4. Курбанов, Э.А. Использование космических снимков ALOS для выявления площадей бывших сельскохозяйственных угодий, зарастающих лесом / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин // Геоматика. – 2010б. – №4. – С. 68-72.
5. Курбанов, Э.А. К вопросу об углерододепонирующих насаждениях / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьёв, Л.С. Мошкина, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев // Вестник МарГТУ – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2008. – №3. – С. 5-17.
6. Курбанов, Э.А. Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьёв, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев, Т.А. Александрова // Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – № 2(9). – 2010а. – С. 14-20.
7. 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.
8. 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.
9. Лежнин, С.А. Использование анализа главных компонент при выявлении молодняков лиственных пород на залежах / С.А. Лежнин, О.М. Акбаров // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия Технологическая. – Йошкар-Ола, 2014. – С.33-38.
10. Лежнин, С.А. Определение зарастания залежей Марийского Заволжья древесной растительностью по данным ДЗЗ / С.А. Лежнин // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международной конференции. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – С. 114-118.
11. Лежнин, С.А. Дистанционный метод оценки формирования молодняков на залежах Марийского лесного Заволжья по спутниковым снимкам: автореф. дис… канд. с.-х. наук / С.А. Лежнин. – Йошкар-Ола, 2015. – 22 с.
12. О внесении изменений в Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях: федеральный закон от 03.02.2014. – №6-ФЗ (действующая редакция, 2016).
13. Хлюстов, В.К. Автоматизация комплексной оценки лесных ресурсов и мониторинг состояния лесов дистанционными методами нового поколения / В.К. Хлюстов // Лесное хозяйство. – 2011. – №6. – С.13-14.
14. 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.
15. 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. – 2016. – P. 173-192.
16. Lukas, 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. – №62. – P. 165–185.
17. 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 - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 2011. – P.1895.
18. Prishchepov, A.V. The effect of Landsat ETM/ETM + image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe / A. V. Prishchepov, V. C. Radeloff, M. Dubinin, C. Alcantara // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 126. – P. 195-209.
19. USGS Global Visualization Viewer [Electronic resourse]. – URL: http://glovis.usgs.gov/. – 18.11.2016.

СОДЕРЖАНИЕ

Thomas A. GIS based modelling of spatially distributed direct runoff and infiltration in the KOSH region of South Africa using rinspe hydrologic model……... 6

Jian-Wan Ji, Jin-Min Sha, Xin-Tong Li. Land change detection based on object-based multi-source remote sensing images……. 18

Liu G., Wang J. Study on ecological vulnerability assessment of small watershed based on GIS……. 28

Демаков Ю.П., Исаев А.В., Бродников С.Н., Краснов В.Г. Характер изменения параметров микроклимата почв в лесных биогеоценозах Республики Марий Эл..……. 34

Хлюстов В.К., Лебедев А.В. Возрастное изменение чистой первичной продукции сосновых древостоев по типам лесорастительных условий ..…… 44

Елсаков В.В., Щанов В.М., Бирюкова В.С., Кулюгина Е.Е., Дубровский Ю.А. Изменения предгорных лесов бассейна р. Щугор по материалам спутниковой съемки периода 1986-2016 гг……...…… 51

Терехин Э.А. Процессы лесовозобновления на залежах юго-запада Среднерусской возвышенности…..…….. 57

Браун М. Круговорот углерода в управляемых и неуправляемых лесах Европы.. 62

Полевщикова Ю.А., Воробьев О.Н. Мониторинг нарушенности лесного покрова по спутниковым снимкам……...…… 70

Иванов А.В., Лошаков С.Ю. Эмиссия углерода с поверхности фрагментов валежа разных классов разложения…….…….. 79

Рахматуллина И.Р., Рахматуллин З.З., Габделхаков А.К. Влияние морфометрических показателей рельефа на размещение лесообразущих древесных видов Бугульминско-белебеевской возвышенности (в пределах Республики Башкортостан)…… 84

Никифоров А.А. Аэрофотосъемка участков лесного фонда Лисинского учебно-опытного лесхоза беспилотным летательным аппаратом..…… 92

Чымыров А.У., Байбагышов Э.М., Дегембаева Н.К, Исмаилов Н.Ы, Урмамбетова Т.К., Айыпов Б.К. Изучение экосистемы пойменных лесов реки Нарын с использованием спутниковых снимков сверхвысокого разрешения…….……... 100

Xingqi S., Jinliang W., Jia L., Guangjie L. Remote monitoring of water area in Dongping lake of Shandong province…… 106

Мартынова М.В., Султанова Р.Р. Особенности лесообразовательного процесса в липняках и на их вырубках в Республике Башкортостан…..…….. 111

Нуреева Т.В., Романов Е.М., Белоусов А.А., Ушнурцев А.В. Восстановление продуктивности исключенных из сельскохозяйственного пользования деградированных земель созданием плантаций сосны обыкновенной…… 117

Курбанов Э.А. Два десятилетия исследований растительного покрова по MODIS….. 123

Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Влияние водоудерживающей способности как фактор повышения устойчивости и биологической продуктивности сосновых лесов……. 132

Хуторова Н.А. Экологизация экономической политики в условиях изменения климата…….…… 141

Смышляева М.И., Краснов В.Г., Антропова А.В., Кириллов С.В. Фитомасса сеянцев дуба черешчатого с закрытой корневой системой в зависимости от объёма ячеек контейнера…….…… 146

Бектуров А.К., Ногойбаева К.Б. Создание топографических карт и планов по данным из беспилотного летательного аппарата проектного института «Кыргызгипрозем»……..……..... 150

Смирнова Л.Н. Экологический мониторинг зеленых насаждений г. Йошкар-Олы по спутниковым снимкам……... 157

Меньшиков С.А. Оценка зарастания гарей по спутниковым снимкам (на примере государственного природного заповедника «Присурский»)…..…… 168

Шевченко А.С. Применение ГИС-технологий при определении местоположения комплекса мусороперерабатывающего завода и прилегающего к нему полигона ТБО 174

Демишева Е.Н., Воробьев О.Н. Методика дистанционной оценки влияния изменения климата на фенологию лесов Республики Марий Эл…….. 180

Лежнин С.А. Мониторинг зарастающих сельскохозяйственных земель Республики Марий Эл по снимкам Landsat-8…..…… 192

CONTENTS

Thomas A. GIS based modelling of spatially distributed direct runoff and infiltration in the KOSH region of South Africa using rinspe hydrologic model……... 6

Jian-Wan Ji, Jin-Min Sha, Xin-Tong Li. Land change detection based on object-based multi-source remote sensing images……. 18

Liu G., Wang J. Study on ecological vulnerability assessment of small watershed based on GIS……. 28

Demakov Yu.P., Isaev A.V., Brodnikov C.N., Krasnov V.G. Character of parameters change of soil microclimate in forest biogeocenosis of Mari El Republic……..…. 34

Khlustov V.K., Lebedev A.V. Net primary production of pine stands by type of forest growth conditions……... 44

Elsakov V.V., Shchanov V.M., Birjukova V.S., Kulyugina E.E., Dubrovskiy Yu.A. The monitoring of Shchugor river basin forests changes of 1986-2016 years time period with satellite data…… 51

Terekhin E.A. Reforestation on abandoned lands southwest of Central Russian upland……... 57

Braun M. Carbon cycling in managed and unmanaged forests……..……. 62

Polevshchikova Yu.A., Vorobiev O.N. Monitoring of forest cover disturbance with the use of satellite images……... 70

Ivanov A.V., Loshakov S.Y. Carbon emissions from surface fragments of lying dead-wood in various stages of decay……..……... 79

Rakhmatullina I.R., Rakhmatullin Z.Z., Gabdelkhakov A.K. Influence of morphometric indexes of the relief on placement of wood views of Bugulma-belebey upland (within the Republic of Bashkortostan)…….……... 84

Nikiforov A.A. Aerial photography of forest fund of Lisino FES by unmanned aerial vehicle……... 92

Chymyrov A.U., Baibagyshov E.M., Degembaeva N.K., Ismailov N.Y., Urmambetova T.K., Aiypov B.K. Study of the Naryn river floodplain forest ecosystem by using very high resolution satellite imagery……... 100

Xingqi S., Jinliang W., Jia L., Guangjie L. Remote monitoring of water area in Dongping lake of Shandong province……... 106

Martynova M.V., Sultanova R.R. Features of forest-forming process in lime_tree forests and on their felling in the Bashkortostan Republic……..…….. 111

Nureeva T.V., Romanov E.M., Belousov A.A., Ushnurtsev A.V. The productivity reconstruction of the suspender from the agricultural use degraded lands by creating artificial forests of scots pine……... 117

Kurbanov E. Two decades of vegetation cover research with the use of MODIS…….…... 123

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. The effect of water-holding capacity as a factor of stability increasing and biological productivity of pine forests……...……. 132

Khutorova N.A. Economic policy's greening in conditions of climate change…….…… 141

Smyshlyaeva M.I., Krasnov V.G., Antropova A.V., Kirillov S.V. Phytomass pedunculate oak (*Quercus robur L.*) seedlings with closed root system depending on the volume cell container…….……... 146

Bekturov A.K., Nogoybaeva K.B. Creating the topographic maps and plans according to data from unmanned aerial vehicle of project institute «Kyrgyzgiprozem»…… 150

Smirnova L.N. Ecological monitoring of urban forests of Yoshkar-Ola by satellite images…….. 157

Menshikov S.A. Monitoring of reforestation on burnt areas by satellite images (on the example of the state natural reserve «Prisursky»)……..……... 168

Shevchenko A.S. Application of gis technology in determining of location for complex waste recycling plant and the adjacent landfill……...…….. 174

Demisheva E.N., Vorobiev O.N. Method of remote assessment of impact of climatic chamge on forest phenology in Republic Mari El……..…….. 180

Lezhnin S.A. Monitoring of reforestation on abandoned agricultural lands in Republic Mari El using Landsat-8 images……..…… 192

Научное издание

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

Сборник научных статей

Редактор *Л. С. Емельянова*
Компьютерная верстка *С. А. Лежнин*

Подписано к использованию *28.12.2016*

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

Редакционно-издательский центр ПГТУ
424006 Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17

Центр устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов
424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3